

华北电力大学（保定）

硕士学位论文

分布式电源并网后配电网调压问题的研究

姓名：杨艳芳

申请学位级别：硕士

专业：电力系统及其自动化

指导教师：杨淑英

20081218

摘 要

分布式电源在电力系统中得到越来越广泛的应用，但随之给电网带来一些新的技术难题。本文针对分布式电源接入配电网之后对电压造成的影响及电压调整进行分析研究。首先简单介绍了现在比较热门的四种分布式电源技术；接着利用叠加原理算法分析了分布式电源引入之后的电压分布，重点研究了分布式电源以不同的容量、不同的接入位置、不同的功率因数接入电网后对配电网电压的影响；并针对分布式电源在辐射形配电网中的接入点问题，提出了一种分布式电源的最优接入点算法；为更加准确的分析分布式电源引入后对配电网电压的影响，建立了新型静止无功发生器对其进行电压调整的仿真模型，并通过仿真，证明在分布式电源并网和退出运行时的可行性。

关键词：分布式电源，配电网，电压调整，新型静止无功发生器

ABSTRACT

Distributed generations are applied in power system more and more widely, but the increasing number of distributed generations brings about some technical problems. The paper mainly studies the influence on voltage by introducing the distributed generations into the distribution network and voltage regulation. The thesis firstly introduces simply four popular distributed generation techniques, secondly uses the algorithm of superposition principle to analyze voltage profile after introducing DG, mainly studies the influence of voltage in distribution network caused by the varieties of size, location and power factor of DG, then proposes an algorithm of optimal access point according to the access point problem of DG in the radiation distribution network. In order to analyze the influence of voltage in distribution network after introducing DG more accurately, this paper establishes the new ASVG simulation model to regulate voltage. In the end, the simulation results improve the feasibility of the proposed method when DG is in or out of the distribution network.

Yang Yan-fang (Power System and Its Automation)

Directed by Associate Prof. Yang Shu-ying

KEY WORDS: DG, distribution network, voltage regulation, ASVG

摘 要

分布式电源在电力系统中得到越来越广泛的应用，但随之给电网带来一些新的技术难题。本文针对分布式电源接入配电网之后对电压造成的影响及电压调整进行分析研究。首先简单介绍了现在比较热门的四种分布式电源技术；接着利用叠加原理算法分析了分布式电源引入之后的电压分布，重点研究了分布式电源以不同的容量、不同的接入位置、不同的功率因数接入电网后对配电网电压的影响；并针对分布式电源在辐射形配电网中的接入点问题，提出了一种分布式电源的最优接入点算法；为更加准确的分析分布式电源引入后对配电网电压的影响，建立了新型静止无功发生器对其进行电压调整的仿真模型，并通过仿真，证明在分布式电源并网和退出运行时的可行性。

关键词：分布式电源，配电网，电压调整，新型静止无功发生器

ABSTRACT

Distributed generations are applied in power system more and more widely, but the increasing number of distributed generations brings about some technical problems. The paper mainly studies the influence on voltage by introducing the distributed generations into the distribution network and voltage regulation. The thesis firstly introduces simply four popular distributed generation techniques, secondly uses the algorithm of superposition principle to analyze voltage profile after introducing DG, mainly studies the influence of voltage in distribution network caused by the varieties of size, location and power factor of DG, then proposes an algorithm of optimal access point according to the access point problem of DG in the radiation distribution network. In order to analyze the influence of voltage in distribution network after introducing DG more accurately, this paper establishes the new ASVG simulation model to regulate voltage. In the end, the simulation results improve the feasibility of the proposed method when DG is in or out of the distribution network.

Yang Yan-fang (Power System and Its Automation)

Directed by Associate Prof. Yang Shu-ying

KEY WORDS: DG, distribution network, voltage regulation, ASVG

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《分布式电源并网后配电网调压问题的研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 杨艳芳 日 期： 2008.12.15

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 杨艳芳

导师签名： 杨淑英

日 期： 2008.12.15

日 期： 2008.12.15

第一章 绪论

1.1 背景及意义

随着电力系统竞争的日趋激烈，建立和发展电力市场已经成为国际电力工业发展的趋势。在全球电力市场环境下，引起发电技术变革，使独立发电运营商投资新兴经济的分布式电源技术（Distributed Generation, DG）成为可能^[1]；电力市场的建立同样给电力系统运行的经济性和可靠性带来挑战，传统大容量电力系统暴露出的弊端更加突出：

(1) 市场环境加大了负荷波动、发电厂投资等因素随机变化程度，而大型电力系统不能灵活跟踪负荷变化，造成发输电设备投资容量浪费；

(2) 集中式大电网结构对偏远地区供电造成输电费用过高；

(3) 互联大电网系统局部事故容易导致大面积停电，严重威胁了系统安全稳定性，并由于电力中断造成经济损失。

另一方面，世纪的能源问题也是各国关注的重点问题。有效使用能源，节约能源，保护环境，实现可持续发展长远战略观念深入人心。各国政府都积极制定环保和节能政策，大力鼓励发展节能技术和可再生能源发电技术以解决能源紧缺和环境污染问题^[2]。

分布式电源技术正是基于以上原因成为电力系统新的研究热点，并在未来电力系统中发挥重大作用。但是，DG 并不是简单的发电技术，可以在电力系统随心所欲的使用，只有在满足一些技术约束条件下，对其接入系统容量合理规划和设计，通过选择合适的类型在需要的时候和位置正确的应用，才能发挥其经济作用，环境性能以及使系统获得更好的可靠性。同时，分布式电源在发挥优势的同时，会给电力系统运行和稳定性带来许多问题和挑战。因此，针对分布式电源对电力系统负面影响，研究解决问题的方法，为分布式电源供电与传统电力系统协调运行，发挥它对系统的补充优势也有重要的理论指导意义和实际应用价值^[3-5]。

本课题重点研究 DG 并入配电网的电压以及相应的电压调整措施。结合近年来国内外分布式电源接入配电网后对配电网运行和控制影响的研究成果和文献，在分析分布式电源技术的基础上，针对含有分布式电源的配电网电压分布进行定量的研究，系统的分析分布式电源对配电网电压的影响，提出分布式电源的最优配置方法，最后通过建模仿真，研究分布式电源引入之后的配电网电压调整。文献[8]总结了 DG 影响配电网电压控制的几点因素：①现有的自动电压控制器(Automatic Voltage Control, AVC)通过控制无源配电网(几乎没有发电机存在)电压幅值的大小而工作的；②DG 位于偏远地区，远离主变电站，在主变电站实现电压控制较困难；如变

电站到发电机之间的线路阻抗大、负荷密度低，电压控制甚至不能实现；③如果接于馈电线的 DG 容量额定值大于馈电回路的总负荷量，通过降压变压器的潮流将反向，致使变压器低压侧成为电源；④DG 的类型(同步机、异步机)及运行条件影响电压控制。

文献[9]基于分布式发电稳定性建模的研究方法将 DG 视为备用电源、削峰和电网测量应用三个模块。在辐射状电网中，通过机械或电力电子转换开关来实现 DG 作为备用电源投入，削峰和电网测量应用模块则视为“负”负荷。在网状配电网中，为适应基于辐射状网络稳定性分析算法，将恒压源代替 DG，并在机组的出口处安装断路器。文献[10]借助于电力系统计算软件包(ERACS)进行的仿真计算表明，在保持电压稳定、减少线路能量损耗和改善电网系统频率特性方面，分布式发电与传统的调节变压器的分接头的方式相比，前者在技术上更有效、更实用。

1.2 分布式电源的国内外研究现状

分布式电源受到世界各国的高度重视，认为它将成为人类能源可持续发展的一个新阶段，成为目前解决资源短缺和环境污染的最佳技术选择。在不同的研究领域，分布式电源有不同的分类方式。根据所使用一次能源的不同，分布式电源技术可分为基于化石能源的分布式电源技术、基于可再生能源的分布式电源技术以及混合的分布式电源技术。基于化石能源的分布式电源技术主要由以下三种技术构成：往复式发动机技术、微型燃气轮机技术、燃料电池技术。基于可再生能源的分布式电源技术主要由以下几种技术构成：太阳能光伏发电技术、风力发电技术。混合的分布式发电技术通常是指两种或多种分布式发电技术及蓄能装置组合起来，形成复合式发电系统。

在美国，正在研究开发方便用户就近利用分布式电源的多种新型技术，例如：

(1) 分布式电源的成批控制技术(群控技术)，在负荷高峰时向电网供电的调峰技术；

(2) 根据用户的要求按需供电的多品质供电系统；

(3) 区域电力网络系统。将分布式电源、贮电装置和电力设备组合起来，根据区域用的要求提供更加灵活有效的供电服务。

在欧洲，正在研究普及分布式电源的政策。在技术开发方面，尤其重视电力系统与分布式电源的联接问题，为此在 2001 年 12 月制定了一个旨在促进包括分布式电源的“能源网络通道”的名为“Integration”的计划。这是一个通过统一协调欧洲包括欧盟各成员国的分布式电源，确保电力供给的安全性和可靠性的研究开发计划。

在日本，分布式发电在促进用电市场竞争方面已经起到很大的作用，主要表现

在：增强市场自由化，允许更多的用户参与选择、产出及输出能源；促进备用容量、输配电及辅助服务合理定价的形成。

分布式电源技术在我国目前还处于起步阶段，小水电和风力发电已经得到了广泛的应用，但还有很大的潜力，如风力发电。中国风能资源丰富，可开发的装机容量约 2.53 亿 kW。截止到 2003 年底，全国风能资源丰富的 14 个省（自治区）已建成风电场 40 座，累计运行风力发电机组 1042 台，总容量达 567.02MW。其它几种分布式发电方式也在进行着积极的研究和商业示范运行。

从整体来看，我国分布式电源的水平较低。无论是市场占有率，还是在能源结构中的比重乃至发电设备制造水平，都远远落后于美国、日本等发达国家，甚至不如风能开发晚于我国的印度。光伏发电在地广人稀的西藏地区使用，大城市仅仅是做了一些试点。其他的一些发电形式更是只有形象工程的意义了，所以我国分布式电源发展的任务很重^[11]。

1.3 分布式电源对电力系统的主要影响

无论是农村或郊区的放射状配电系统还是城市的网状配电系统，都是以配电系统和用户端没有接入任何电源为基础设计、运行的。当配电系统中接入大量的分布式电源之后，将很大程度上影响网络潮流的大小、方向，以及电气元件和用户端的电压。这些影响带来正面效果或负面效果主要取决于电力系统的运行特性以及分布式电源本身的特点^[12]。此外，分布电源的增加不可避免地使配电系统更加复杂化。因此必须深入研究分布式电源与电网在各种情况下的相互作用。

1.3.1 分布式电源对网络损耗和线路潮流的影响

在配电网中的负荷近旁接入分布式电源系统后，整个配电网的负荷分布将发生变化，文献[13]提到主要有 3 种情况：①所有负荷节点处的负荷量均大于该节点处 DG 的输出量；②至少有一个负荷节点处的负荷量小于该节点处 DG 的输出量，但系统的总负荷量大于所有的输出总量；③至少有一个负荷节点处的负荷量小于该节点处 DG 的输出量，且系统的总负荷量小于所有 DG 的输出总量。对于情况①，DG 的引入使配电网中所有线路的损耗减小；对于情况②，DG 的引入可能导致配电网中某些线路的损耗增加，使配电网总体损耗将减小；对于情况③如果所有 DG 的发电总量小于 2 倍的负荷总量，那么 DG 的影响与情况②相同，否则将使配电网的线路损耗增加。由此可见，分布式电源的引入可能增大也可能减小系统损耗，这取决于分布式电源的位置、与负荷的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。

分布式电源的出现改变了配电系统单向潮流结构，使潮流大小和方向无法预测。根据分布式电源安装位置不同，馈线段的潮流可能增加也可能减少。当馈线上 DG 输出功率大于负荷需求时，会造成馈线的某些段或者全部潮流完全反向。潮流

的改变导致原有电压调整设备如有载调压变压器失去了正常的调节作用。

1.3.2 分布式电源对系统运行可靠安全性的影响

分布式电源接入系统可能会影响系统的运行可靠性和安全性。对于典型放射状配电系统，DG 出现改变了电网结构，改变了短路电流大小和持续时间，导致按原有网络设计的保护装置误动作，破坏保护设备间的协调运行，妨碍了自动重合闸动作。特别是当短路电流大于原有系统断路器中断容量时将导致设备损坏。

当 DG 并网运行时，应该提供有效的接地，以防止单相接地短路时非故障相出现过电压；当包含 DG 电网与主网分离后，DG 仍然向所在独立电网供电，这就是孤岛的形成。无意形成的孤岛会对系统稳定性、维修人员造成危害，还可能引起谐振过电压，损坏用户设备。

此外，一些研究表明，当系统受到干扰时，大量 DG 渗透系统和某些类型 DG 技术以及电力电子设备将增大转子转速偏差，导致振荡持续时间延长，影响系统暂态稳定，威胁系统安全运行^[14]。

随着 DG 的大量接入，其发电量将成为电力系统供电总量中的重要组成部分。因此 DG 的可靠运行将对电力系统供电可靠性具有重要意义。目前，在许多 DG 大量并网运行的国家面临这样的一个问题：当系统发生一定的扰动时，由于反孤岛保护(DG 的一种保护类型)设置得灵敏度高，误动作时造成大量 DG 被切除，此后系统由于功率缺额较多将不能正常运行。此外，停电以后的恢复过程，在连续有较多 DG 的区段也需格外小心。

1.3.3 分布式电源对电力系统规划的影响

分布式电源给配电网规划所带来的影响主要概括为以下几个方面^[15-17]：

(1) DG 的出现会使电力系统的负荷预测、规划和运行与过去相比有更大的不确定性。大量的用户安装 DG 为其提供电能，使得配电网规划人员更加难以准确预测负荷的增长情况，从而影响规划。

(2) 规划问题的动态属性同其维数密切相联，若在出现许多发电机节点，使得在所有可能的网络结构中找到最优的网络布置方案就更加困难。

(3) 安装 DG 的用户或独立发电公司，它们与想维持系统现有的安全和质量水平不变的配电网公司之间的冲突。为了维护系统的安全、稳定的运行，必须使 DG 能够接受调度，要实现该目标，通过电力电子设备对其进行需要的控制和调节，将 DG 单元集成到现有的配电系统中，这不但需要改进现有的配电自动化系统还要由被动到主动（电压调整、保护政策、干扰和接口问题）地管理电网。DG 机组类型及所采用能源的多样化，使得如何在配电网中确定合理的电源结构、如何协调和有效地利用各类型的电源成为迫切需要解决的问题。

1.3.4 分布式电源对电能质量和继电保护的影响

电力系统的电压是衡量电能质量的一个重要指标。在 DG 的接入和退出系统的过程中,可能由于不同步或者能量缺额等原因造成较大的系统电压波动。由于是由用户来控制的,因此将根据其自身的需要起停和停运,这可能使配电网的电压常常发生波动。所以,应对 DG 的接入退出进行准确的控制,同步发电机应控制在正确同步条件下接入,感应电机可以通过柔性启动装置减小接入时的冲击电流,这样可以将电压波动减小到较低的程度。

未来的 DG 可能大量采用电力电子型电源,电压的调节和控制方式与常规方式会有很大不同,需要相应的控制策略和手段与其配合。电力电子型的分布式电源易产生谐波,造成谐波污染,造成明显的电压畸变。

DG 接入配电网后,辐射式的网络将变成一个遍布电源和用户互连网络,潮流也不再单向地从变电站母线流向各负荷。配电网的根本性变化使得网络各种保护定值与机理发生了深刻变化。

文献[18]提出,故障发生时为确保保护装置正确动作,应切断电网中的分布式电源。从而引发以下问题:①过电流故障的切除与 DG 的切断在时限上的配合;②自动重合闸开断时间间隔内,确保 DG 快速切断;③在架空线和地下电缆的混合线路中切断 DG,变压器空载运行,电缆对地电容与变压器 Δ 侧的线圈发生铁磁谐振,产生不规则的高电压大电流严重威胁线路的电力器件。

文献[19]设计了一种基于频率变化率的数字式分布式电源继电保护装置,通过改善灵敏度和时间响应特性,实现分布式电源与主电网的失步保护。

1.4 论文的主要工作

随着社会经济和人民生活水平的提高,对能源需求的不断增加,分布式电源与大型电力系统相关联引起了人们的广泛关注。结合近年来国内外分布式电源接入配电网后对配电网运行和控制影响的研究成果和文献,在分析分布式电源技术的基础上,针对含有分布式电源的配电网电压分布进行定量的研究,系统的分析分布式电源对配电网电压的影响,提出分布式电源的最优配置方法,最后通过建模仿真,研究分布式电源引入之后的配电网电压调整。本论文的主要工作如下:

(1) 分析总结国内外有关分布式电源的研究现状,准确理解分布式电源的概念。对分布式电源进行简单的分类,着重分析目前 4 种具有发展潜力的分布式电源技术,阐述分布式电源技术的积极作用。

(2) 建立典型的配电网模型,包括电压等级、接线方式、负荷模型、运行方式;建立直接联网的分布式电源接入配电网后的模型。

(3) 依据上述所建模型,研究分布式电源引入配电网后的电压变化,提出一种

基于叠加原理的电压分布算法，通过仿真验证该算法的正确性。

(4) 基于叠加原理的电压分布的算法公式，确定分布式电源引入配电网后的各项参数，包括 DG 的容量、安装位置以及功率因数，然后研究其对配电网电压的影响，并总结规律进行分析。

(5) 针对辐射形配电网结构，提出基于综合比较的分布式电源的最优接入点算法，利用 MATLAB 仿真软件，对分布式电源接入位置和接入容量发生变化时的配电网潮流分布、网络损耗和系统电压水平进行分析，并通过实例进行验证。

(6) 全面讨论电力系统的各种调压方法，针对接入分布式电源配电网的电压曲线特点，提出将静止无功发生器 ASVG 引入进行调压，建立 ASVG 模型，并利用仿真来证明其对带有分布式电源的配电网调压具有较好的效果。

第二章 分布式电源概述

2.1 引言

目前,世界电力系统处于传统大型互联电力系统向分布式电源供电与电网结合供电的过渡阶段。分布式电源并不是新概念,人类最早利用能源的方式就是“分布式”一小型、接近负荷侧的能源供给方式。我国早期的小火电、小热电,也属于分布式电源,由于技术性能不好和环境污染问题而被淘汰。近年来,随着竞争性的零售电力市场的出现和新型分布式电源技术研究的突破性进展,又引起了对分布式电源新一轮的更广泛关注,分布式电源与传统的电力系统的优势互补使得其在电力行业得以迅速渗透。

分布式电源在不同研究领域有不同的分类方式。一般可以根据 DG 的技术类型、所使用的一次能源及和与电力系统的接口技术进行分类。本章按照技术类型进行分类,对当今比较受关注的风力发电、太阳能光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机四种分布式电源技术做了详细的介绍,并且对分布式电源技术的积极作用进行了简单的阐述。

2.2 分布式电源技术

2.2.1 分布式电源的概念

分布式电源一般是指为满足某些终端用户的需求,支持已有的配电网经济运行而设计和安装在用户侧附近的小型发电机组。分布式电源的规模一般不大,大约在几十千瓦到几十兆瓦。目前主要的分布式电源有风力发电、光伏发电、燃料电池、微型汽轮机、燃气轮机发电、往复式发电机、储能装置等。由于靠近用户提高了供电服务的可靠性和电能质量,同时又具有环境友好型,资源节约等特点,在技术发展,公共环境政策和电力市场扩大等因素的共同作用下,分布式电源将成为新世纪重要的能源选择。它以分散的方式布置在用户附近,功率一般在数千瓦至 50MW 之间,与公共电网相对独立,以天然气、沼气、生物质气和轻油等作为燃料,实现热、电、冷三联供。与传统远离负荷中心依靠远距离输配的电源相比,分布式电源被直接安装在负荷所在的配电网中,无需通过电网输送,而且利用管网和电缆系统向特定区域内同时直供电力、蒸汽、热水和冷气。

分布式电源与传统集中式发电的主要区别是其规模较小且靠近用户,一般可以直接向附近的负荷供电或根据需要向电网输出的电能。DG 指的是为了满足一些特殊化用户的需求、支持已有配电网的经济运行而设计和安装在用户处或其附近的小

型发电机组，或坐落在用户附近使得负荷的供电可靠性及电能质量都得到增强，或者由于就地应用热电联产使得效率得到提高的发电形式。

2.2.2 分布式电源的分类

在不同的研究领域，DG 有不同的分类方式。一般可以根据 DG 的技术类型、所使用的一次能源及其和电力系统的接口技术进行分类。DG 的技术类型见表 2-1 所列。其中“*”表示存在该种规模的分布式电源。

表中所使用的一次能源有化石燃料、可再生能源及电能的储存。若分布式电源与电力系统相连时，并网技术类型有直接与系统相联机电式和通过逆变器与系统相联两大类。若分布式电源是旋转式电机直接发出基频交流电则属于第一类，而逆变器型通常指的是发出直流电的分布式电源和发出高频交流电的分布式电源。但在实际应用中，大部分文献习惯于按照其大小分为：小型（小于 100kW）、中型（100kW~1MW）和大型（大于 1MW）三类。

表 2-1 分布式电源分类

技术类型	一次能源	输出	与系统的接口	小型 <100kW	中型 <1MW	大型 >1MW
小型燃气轮	化石燃料, 可再生能源	AC	直接相联			*
地热发电	可再生能源	AC	直接相联		*	*
水利发电	可再生能源	AC	直接相联		*	*
风力发电	可再生能源	DC	逆变器	*	*	*
光伏系统	可再生能源	DC	逆变器	*	*	
燃料电池	化石燃料, 可再生能源	DC	逆变器	*	*	*
太阳热发电	可再生能源	AC	直接相联	*	*	*
蓄电池储能	电网或 DG	DC	逆变器	*	*	*
电容器储能	电网或 DG	DC	逆变器	*	*	
飞轮储能	电网或 DG	DC	逆变器		*	*
超导电磁储能	电网或 DG	DC	逆变器		*	*
微透平	化石燃料, 可再生能源	高频 AC	逆变器	*	*	
生物质能发电	可再生能源或废弃物	AC	直接相联	*	*	*
具有同步或感应发电机的往复式引擎	化石燃料, 可再生能源	AC	直接相联	*	*	*

下面对目前比较受关注的四种分布式电源技术做简单介绍。

2.2.2.1 风力发电技术

风力发电技术是将风能转化为电能的发电技术，可分为独立运行与并网运行两

类，前者为微型或小型风力发电机组，容量一般为 100W~10kW，后者的容量通常超过 150kW。风力发电是目前新能源开发技术中最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式。

(1) 风轮机

风力发电的原理是：天然风吹转叶片，带动发电机转子旋转而发电。风力发电机的风轮机多采用水平轴、三叶片结构。叶片的直径随单机容量的增大而加长，目前世界上最大的旋转叶片的直径达 66m，塔架高度达 80m。功率调节是风轮机的关键技术之一，目前投入运行的机组主要有两类功率调节方式：一类是定桨距失速控制；另一类是变桨距控制。大部分风力发电机都有对准风向机构，自动使风轮机处于迎风状态。随着技术的发展，已出现了浓缩风能型风力发电机迎风及限速自动控制系统等新型风力发电机系统。

(2) 发电机

按照风轮发电机转速是否恒定，风力发电可分为定转速运行与可变速运行两种方式；按照发电机的结构区分，有异步发电机、同步发电机、永磁式发电机、无刷双馈发电机和开关磁阻发电机等机型。早期的风力发电机大多采用附带增速装置的异步发电机。异步发电机结构简单，发出的工频交流电可直接使用或经变压器输入电网。多数情况下，异步风力发电机定速旋转；绕线式异步电机可通过在转子接入可变电阻实现低频励磁来调节转矩大小，也可以变速运行。因为要从电网获得励磁电流，所以异步风力发电一般不能脱离电网单独运行，除非用某种方式获得励磁。

同步风力发电机不需要增速传动结构，整体结构简单。随着电力电子变流技术的进步，先进的同步风力发电常采用交—直—交的接入方式，即先把发出的交流变成直流，然后再逆变成工频交流接入用户或电网。这种发电方式的优点是：发电机转速不必与电网频率要求的转速同步。由于其输入功率存在固有的不平衡性，风力发电在一定程度上可起到蓄能作用，一般风力发电机输出的交流电经过整流后向蓄电池组充电，然后通过逆变器连入电网。其数学模型可由两个相连的动态分量来表示：

$$\omega_G = \frac{-(D_G - D_T)}{M_G} \omega_G + \frac{D_G - D_T}{M_G} \omega_T + \frac{1}{M_G} T_0 - \frac{1}{M_G} P_G \quad (2-1)$$

$$\delta = -\omega_G + \omega_T \quad (2-2)$$

$$\omega_T = \frac{D_T}{M_T} \omega_G - \frac{k}{M_T} - \frac{D_T}{M_T} \omega_T + \frac{1}{M_T} T_n \quad (2-3)$$

式中 ω ——角速度； M ——转矩； T ——时间常数；下标 G、T——发电机、汽轮机； k ， D ——轴的硬度系数、阻尼系数。

(3) 运行方式

风力发电的运行方式可分为独立运行、并网运行与其它发电方式互补运行等。

独立运行是指风力发电机输出的电能经蓄电池储能，再供应用户使用。这种方式可供电网达不到的边远农村、牧区、海岛等地区使用，一般单机容量数百到数千瓦。

并网运行是在风力资源丰富地区，按一定排列方式安装风力发电机组，成为风力发电场，发出的电能全部经变压器送至电网，这是目前风力发电的主要方式。风力同其它发电方式互补运行，如风力—柴油机组互补发电方式，风力太阳能光伏发电方式，风力—燃料电池发电方式等，这种方式不仅可弥补风速变化所带来的发电量突然变化的影响，保证一年四季均衡供电，而且可延长蓄电池寿命，同时还可以使离网型小型用户发电系统的发电成本降低，自然资源得到充分利用。

2.2.2.2 太阳能光伏发电技术

众所周知，太阳能取之不尽，用之不竭。据测算，1年内到达地球表面的太阳能总量是目前世界已探明储量能源的1万多倍。我国年均日照长，辐射总量大，属于太阳能资源较为丰富的国家之一，全国国土面积三分之二以上的地区每年日照时数大于2000h，仅陆地面积每年接受的太阳辐射能就约等于几万个三峡工程发电量的总和。因此开发利用太阳能是大有前途的。

太阳能光伏电池（Photovoltaic Cell—PV）发电技术是利用半导体材料的光电效应直接将太阳能转化为电能。白天发电的盈余倒送电网，晚间用户从电网取电。采用光伏电池发电具有不消耗燃料、不受地域限制、规模灵活、无污染、安全可靠、维护简单等优点。但是光伏电池的转换效率低。目前应用的太阳电池是一种半导体器件（如单晶硅、多晶硅），受到太阳光照时能产生光伏效应，将太阳光能转变成直流电能。在使用时将太阳电池封装成组件，然后根据需要把组件串并联组成方阵。光伏电池的输出功率受日照强度、电池结温等因素的影响，不能调度，而且系统的频率和电压对其基本上没有影响。

$$P_g = F(f, U) \quad (2-4)$$

式中 P_g ——光伏电池输出功率； f ——系统频率； U ——系统电压。

(1) 太阳能光伏发电类型

国际上利用太阳能光伏发电主要有以下3种类型^[20]：

1) 独立光伏发电系统。指仅仅依靠太阳能电池供电的光伏发电系统，从电力系统来说，kW级以上的独立光伏发电系统也称为离网型光伏发电系统。这也是我国目前主要的光伏发电应用市场，且每年以20%的速度增长。主要市场包括农村独立光伏电站、家用光伏电源、光伏水泵，工业领域的光缆通讯、微波通讯、卫星电视接收站、边防哨所电源、公路信号电源、航标及灯塔电源，以及太阳能庭院灯、太阳能路灯、太阳能汽车、太阳能半导体冷藏箱、太阳帽、太阳能充电器、太阳能计算器等等。

2) 并网光伏发电系统。光伏发电系统的主流发展趋势是并网光伏发电系统。该

系统在国外已步入大规模发电阶段，是当今国际上光伏发电的发展潮流，但在我国目前仍处于酝酿试验阶段。太阳能电池所发的电是直流，必须通过逆变器转换成交流，再同电网的交流电合起来使用，这种形态的光伏系统就是并网光伏系统。由于该系统所发电力直接进入电网，省掉了储能的蓄电池组，因而可使其成本下降 18% 左右。

3) 屋顶发电^[21-23]。光伏发电系统与建筑物相结合，构成了屋顶光伏发电系统。对于家庭、小的商业楼可用 PV-蓄能电池（飞轮储能）-永磁电机组成系统（1kW~15kW）；大商业楼和小工业用户可用 PV-DC-AC 逆变器驱动三相感应电机系统（15kW~50kW）。所发电力既可供建筑物使用，也可并入电网。在美国、日本和澳大利亚的一些地区，已经有由屋顶式光伏电池发电设备联成的 PV 系统与当地电网相联，白天发电的盈余倒送电网，晚间用户从电网取电，在供电企业和用户间形成了一种新型的关系。这种屋顶光伏发电系统通过巧妙设计可达到降低建筑造价及光伏发电系统造价的目的。

(2) 并网光伏发电系统

并网光伏发电系统是光伏发电系统的主流趋势。光伏发电系统可分为住宅用并网光伏发电系统和集中式并网光伏发电系统两大类。前者特点是光伏发电系统发的电直接分配给用户负载，多余或不足的电力通过连接网来调节；后者特点是光伏发电系统发的电被直接输送到电网上，由电网把电力统一分配给各用户。目前住宅用光伏系统在国外已得到大力推广，而集中式并网光伏系统应用尚在发展。两者在系统结构上差别不大。

光伏并网系统主要由太阳能电池方阵和并网逆变器组成。并网逆变器是并网光伏系统的中心。逆变器把太阳能电池方阵输出的直流电转换成与电网电力相同电压和频率的交流电，同时还起到调节电力的作用。逆变器有以下几个作用：①在输出电压和电流随太阳能电池温度以及太阳辐照度而变化时，总是输出太阳能电池的最大功率；②输出已抑制谐波的电流，以免把不良运行波及到电网；③倒流输出剩余电力时，自动调整电压，把用户的电压维持在规定范围。当并网逆变器与电网连接时，它始终在功率因数等于 1 的条件下运行，电流和电压几乎同相，仅提供有功功率。

2.2.2.3 燃料电池

燃料电池是一种能将化学能直接转化成电能的装置。它不需要通常火力发电装置中通过锅炉、涡轮、发电机进行的能量形态的变化，也就避免了这些能量形态变化过程中的损失，能够达到很高的发电效率，此外，它还具有以下优点^[24]：

(1) 发电效率高且稳定：燃料电池本体的发电效率可达到 50%~60%，组成的联合循环发电系统在 10~50MW 规模即可达到以 70% 上，若进一步将化学反应产生的

热能加以利用，燃料电池的总效率可达到 80% 以上。燃料电池的发电效率受负荷和容量的影响较小，不论装置的规模大小，在满负荷或低负荷下运行，均能保持高发电效率。

(2) 环境相容性好：用天然气和煤气等为燃料时，CO₂ 为排出量比常规火电减少 40%~60%，SO_x (<1.293mg/cm³) 和 NO_x (<2.586mg/cm³) 的排放量比火电减少 90% 以上。同时，能量转换的主要装置无运动部件，因此噪音极小，在距发电设备 1.044m 处噪音小于 60dB。

(3) 设备可靠性高：对负荷的适应能力强，自动化程度高。燃料电池对过载或欠载都能承受而效率基本不变，负荷变化的范围为 20%~120%；负荷响应速度很快，变负荷率可达 (8%~10%) /min，用于电网调峰优于其他发电方式；发电出力由电池堆的出力和组数决定，机组容量的自由度大。

(4) 电流谐波和电压谐波均满足 IEEE519 标准，电能质量高：燃料电池发电装置可直接建在终端用户附近，省去庞大的输配电网及设备费用，供电可靠性高，且减少损耗自动程度高，可实现无人操作。

(5) 燃料种类广泛：可用于燃料电池发电的燃料种类众多，有氢气、甲醇、煤气、沼气、天然气、轻油、柴油、含氢废气等。

(6) 建设工期短，使用方便：由于采用组件化设计、模块化结构，扩容和增容容易，建厂时间短（平均仅需 2 个月左右）；无需大量的冷却水，占地面积 <1m²/kW；无污染、无噪音，选址几乎没有限制。

总之，燃料电池是一种高效、洁净、方便的发电装置，既适合于作分布式电源，又可在将来组成大容量中心发电站，对电力工业具有极大的吸引力。

2.2.2.4 微型燃气轮机

微型燃气轮机是指功率为数百千瓦以下的以天然气、甲烷、汽油、柴油为燃料的超小型燃气轮机^[25]。满负荷运行时效率可达到 30%，实行热电联产，效率可提高到 75%。微型燃气轮机的特点是体积小、质量轻、发电效率高、污染小、运行维护简单。它是目前最成熟、最具有商业竞争力的分布式电源之一。

这种分布式发电机组的特性和集中式发电机组相似，可以统一调度，但是在热电联产的情况下，微型燃气轮机的各种输出必须满足热量的需要（如式 2-5），并且它的功率变化有一定的时间，即功率变化速度有一定的限制（如式 2-6）。

$$P_{g,\min} \leq P_g \leq P_{g,\max} \quad (2-5)$$

$$\Delta P_g \leq \Delta P_{g,\lim} \quad (2-6)$$

式中 ΔP_g —— 功率的变化； $\Delta P_{g,\lim}$ —— 功率变化的限制。

微型燃气轮机的动态模型和集中式发电机组相似，可写成以下形式^[26]：

$$P_m - P_e = \frac{M}{\omega_R} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2-7)$$

$$P_{m.in} - P_{m.out} = \left[1 - \frac{1}{R} \cdot \frac{\omega - \omega_R}{\omega_R} \right] \quad (2-8)$$

式中 P_m ——原动机功率； P_e ——发电机输出功率； $P_{m.in}$ 、 $P_{m.out}$ ——原动机的输入、输出功率； ω 、 ω_R ——发电机组送、受端的角速度； R ——发电机的阻抗。

微型燃气轮机用于分布式能量系统的主要特点如表 2-2 所示：

表 2-2 微型燃气轮机分布式能量系统的特点

用途	适宜程度	说明
连续发电	一般	虽然设备成本与其它设备相比是低的，但由于低的效率带来高的燃料成本
热电联供	一般	回收热能来自排气，因此，可以方便利用，为了提高发电效率，利用排气加热吸入的冷空气，这样限制了热能回收的质量
尖峰供电	一般	短期运行可以弥补效率低的缺点，不带热回收装置的微型燃气轮机具有低的成本，使微型燃气轮机更适合尖峰供电
绿色能源	不适合	污染物排放较内燃机低，较燃料电池、可再生能源高，低的效率意味着高的 CO ₂ 排放

2.3 发展分布式电源技术的优势和必要性

分布式电源技术与大电网相比有其独特的优势，现今世界的发展潮流也倾向于大电网系统和分布式电源技术相结合的这种节省投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性的方法，发展分布式电源技术的积极作用分为如下几个方面：

(1) 提高经济效益

在将燃料电池化成电力的过程中，产生了大量的热量（平均占燃料能量的 2/3），如果发电系统坐落在本地或者接近厂矿，工业车间就可以应用这些热量。通过利用 CCHP，这些车间可以增加用能效率，降低温室气体的排放和降低电力费用。CCHP 最适合中等至高等热能利用的厂商。因此能源得以合理的梯级利用，从而可提高能源的利用效率（达 70%~90%）。

(2) 减少土地占用

由于公众对输电线路电磁污染的忧虑，开辟新的线路走廊越来越困难，例如，北美和西欧许多国家已决定一般不再新建输电线路。因此直接安置于用户近旁的分布式发电装置，可以减少土地占用，节省输变电投资，是一种非常具有竞争力的方案。

(3) 分布式供电可以作为备用发电

备用发电机在系统停机时提供电力，直到电力服务恢复，依赖敏感电子控制的大型生产设施需要可靠的电力，来避免很高停机费用，分布式电源可以为那些一天24h、一周中每天都需要不间断电力服务的顾客提供在线备用电力，那些为了备用电力而拥有分布式电源的工业厂商，还可以通过在用电高峰期参与发电而减少来自电网的电力，进而减少购买电力的费用。

分布式发电装置可大大提高供电可靠性，可在电网崩溃和意外灾害（如地震、暴风雨、人为破坏、战争）情况下维持重要用户的供电。它还可以保障一些重要的集会的供电安全，如果有处于热备用状态的移动分布式发电车，则供电可靠性大大提高。

(4) 具有良好的环保性能

因其采用天然气用作燃料或者以氢气、太阳能、风能为能源，故可减少有害物的排放总量，减轻环保的压力，具体见下表 2-3；大量的就近供电减少了大容量远距离高电压输电线的建设，由此不但减少了高电压输电的电磁污染，也减少了高压输电线的面积和线路走廊，减少了对线路下树木的砍伐，有利于环保。

表 2-3 DG 技术的效率及主要污染物排放数据 (<1MW) kg/MW·h

技术类型	燃料	效率/% 高热值	CO ₂	NO _x	SO ₂	CO	PM-10
内燃机组	天然气	35-41	444.52-498 .95	0.136-2.72 2	可忽略	0.907-4.082	0-0.272
微透平机组	天然气	22-30	589.67-816 .46	0.091-0.63 5	可忽略	0.136-0.816	>0.014
燃料电池	氢	29-50	362.87-635 .03	<0.0277	0	0.005-0.054	可忽略
生物质能发电	生物质	30-41	0-1043.26	0.136-2.72 2	<0.136	0.907-4.082	0.272-1.814
光伏系统发电	太阳能	不确定	0	0	0	0	0
风能发电	风能	不确定	0	0	0	0	0

(5) 能源利用多样性

分布式发电可利用多种能源，如洁净能源（天然气）、新能源（氢）和可再生能源（风能和太阳能等），并同时为用户提供冷、热、电等多种能源应用方法，因此是解决能源危机结合能源安全问题最好的一种途径。

相对于化石能源而言，可再生能源能流密度较低、分散性强，而且目前的可再

生能源利用系统规模小、效率较低，作为集中供电手段是不现实的。分布式供电方式为可再生能源利用的发展提供了新的动力。我国的可再生能源资源丰富，发展可再生能源是世纪减少环境污染和温室气体排放以及替代化石能源的必然要求，因此为充分利用量多而广的可再生能源发电，方便安全地向偏僻、少能源地区供电，建设可再生能源分布式供电应受到高度重视。

(6) 远程或者独立发电

在与电网隔绝或者远离电网的应用场合，和与电网相连接相比，采用独立的分布式发电可能更加经济。例如，一些系统用户，如果他们不能与零售电力供应商协商，可以与电网分隔开来。再如，我国许多边远以及农村地区远离大电网，因此难以从大电网向其供电。采用太阳能光伏发电，风力发电和生物质能发电的独立发电系统（Stand-alone System）不失为一种优选的方法。

(7) 调峰性能好

由于分布式发电装置工作流程简单，参与运行的系统少，因而启停快速，与电网配合使用时具有优良的调峰性能，且便于实现全自动。对于用户来说，由于电价随着系统需电量和从发电机组可获得的电力量的不同而变化，大的电力用户经常要随时间利用率（Time of Use Rate）来付电费，这将用电费用的差异转化成每天的、季节性的不同，例如高峰期、低峰期、中峰期和平时段。采用时间利用率方式的电力用户可以选择在高电费时期用分布式发电，来减少总体电力费用。

分布式电源技术是一种新型的、很有发展前途的发电和能源综合利用方式，它以其独特的优势越来越受到国内外的关注。我国近年来经济增长迅速，需要增加电力装机容量，扩大电力生产。

2.4 小结

目前我国面临着常规能源资源约束，过分依赖煤炭，污染严重、能源利用率低等问题。发展分布式电源不仅可以推进可再生能源的合理利用，而且对于电力系统建设运行也可以带来可观的经济效益。

本章对各种分布式电源从所使用的一次能源、输出、并网技术、大小等方面进行分类。并详细介绍了现在较为热门的四种分布式电源技术，主要包括风力发电技术、太阳能光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机，分别介绍了它们的工作原理和运行方式。最后简单介绍了发展分布式电源技术的积极作用。

第三章 分布式电源并网后对配电网电压影响的分析

3.1 引言

配电网是以用户端没有电源为基础设计的，其潮流是从系统侧流向负荷侧。配电系统通常采用的调压手段有：改变有载调压变压器的分接头调压，利用电容器调压，安装线路压降补偿调压器等。通过这样一些调压手段保证用户电压维持在规定电压范围内，保证电能质量。在接入分布式电源之后，配电系统从放射状结构变为多电源结构，潮流的大小和方向有可能发生巨大改变，使配电网的稳态电压也发生变化，原有的调压方案不一定能满足接入分布式电源后的配电网电压要求。因此必须评估分布式电源对电力系统电压的影响，以保证在分布式电源应用越来越多的情况下它们不会给用户带来不良后果。

要分析分布式电源对电力系统电压的影响，正确方法之一是利用具有多源分析功能的软件对配电系统进行潮流仿真。对于解决电力系统中某一具体问题，可能适用的软件也不同。通过对多种仿真软件比较，本文选用 MATLAB 进行建模仿真。

MATLAB 产品族是集数值计算、高级绘图及可视化、高级程序开发语言和动态系统建模仿真于一体的开发环境。被广泛应用于包括信号处理与图象处理，控制系统设计，电力系统设计，财务，医药等诸多领域。MATLAB 的一大特性是有众多的面向具体应用的工具箱，包含了完整的函数集用来对信号图象处理，控制系统设计，电力系统分析设计等。MATLAB 提供的 SIMULINK 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包。SIMULINK 为用户提供了图形化建模的接口，它与传统的仿真软件包用微分方程和差分方程建模相比，具有更直观、方便、灵活的优点。MATLAB 中的电力系统工具箱 Simpower Systems 几乎集成了电力系统的所有元件，而且与之相联系的机械、热力、控制系统及其它设备规律的分析均包含其中，此外，用户也可以根据需要构造、封装自己所需的模块。它的仿真结果的有效性已经被加拿大魁北克电站的运行数据、试验数据以及其仿真实验室提供的数据所证实^[26]。利用 MATLAB 强大的数值计算功能和编程技术，可以提高仿真计算和数据分析的灵活性和效率，为仿真、分析电力系统提供了一种新的手段，将其应用于分布式电源接入配电网仿真分析是可行的。

3.2 模型的建立

3.2.1 配电网简介

1 配电网的分类^[27]

电力系统中电源来自发电厂，并通过高压或超高压输电线路传送到负荷侧，然后由电压等级较低的网络把电能分配到不同电压等级的用户。这种在电力网中主要起分配电能作用的网络就称为配电网。配电网按电压等级可分为高压配电网（35~110kV）、中压配电网（6~10kV）和低压配电网（220~380V）；按供电地区的功能可分为城市配电网、农村配电网和工厂配电网。

2 配电网的接线方式

配电网一次接线图可采用放射式接线、树干式接线及环网式接线方式，其形式主要取决于对供电可靠性的要求。

(1)放射式接线

1) 单回路放射式接线。这种接线方式的优点是线路敷设简单，操作维护方便，缺点是可靠性低，某段线路故障时，该段线路上的设备都要停电，影响面积较大。

2) 有公共备用干线的放射式接线。如果要提高单回路放射式接线的供电可靠性，可采用有公共备用干线的放射式接线方式。这样，除了具备单回路放射式接线的优点，另外因有了备用线路，还能保证在电源发生故障时对负荷供电，因而一般可供二级负荷，若备用电源可靠也可供给一级负荷。

(2)树干式接线

1) 单回路树干式接线。从总降压变电所引出干线，所有的负荷都从该干线接出的分支线直接得到供电。由于总的引出线少，可以减少设备的数量及投资，线路架设简单。其缺点是供电可靠性较差，且当干线故障，全干线上的负荷全部停电，一般仅用于对三级负荷供电。

2) 双回路树干式接线。双回路树干式接线可分为单侧供电双回路树干式和双侧供电双回路树干式两种。双回路树干式供电的可靠性比单回路树干式供电可靠性要高，但投资要增加，接线方式更复杂些。对于双侧供电双回路树干式，由于多增加一组电源，供电可靠性更高，可以满足负荷的要求。

(3)环网供电方式

在几种接线方式里，环网供电方式可靠性最高。它可以工作在开环或闭环的状态，不论哪一段出现故障，都可以保证非故障段不停电而继续运行，但接线方式、保护装置及整定配合比较复杂。

具体采用哪种接线方式必须根据实际情况来确定。长期以来，我国的配电网接线形式大多数采用以架空线路为主的放射式供电方式，这种方式一旦某线段故障，影响面较大，且这种网络结构的应变能力差，不适合自动化发展的要求。现在不少地方已逐步改为电缆线路与环网的供电方式，这种方式可以提供实现配网自动化的条件，提高供电可靠性。当然，对于一些变电所，还应根据对供电可靠性的要求、地理环境、造价合理等条件选择其他接线方式。

3.2.2 配电网模型

配电系统的基本单元是馈线，馈线的首端经过高压降压变压器与高压配电网相连接，末端经低压降压变压器与用户相连。我国馈线电压等级大多是 10kV，每条馈线上线路成树状分布，以辐射形网络连接若干台配电变压器。本文所采用的接入 DG 后的配电网结构如图 3-1 所示。网络电压等级为 10kV，变压器是 HV/MV 变电站中常用的有载调压变压器，31.5MVA，110/10kV，高压侧装有调压装置，假设可以进行连续调压。为了使仿真结果具有可比性，假设在各种负载情况下，其高压母线始终保持为 110kV，在此假设下进行各种仿真并作比较分析。

在配电变压器的中压母线上有四条架空线 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ，各条线路长均为 12km，线路为 LGJ-150mm 型架空线，线路参数为：

线路长度为 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 12\text{km}$

线路阻抗为 $Z = 0.064 + j0.147\Omega/\text{km}$

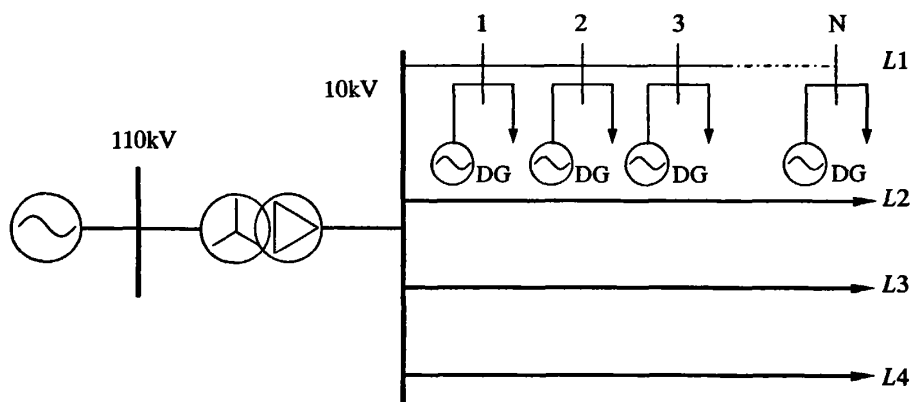


图 3-1 接入 DG 的配电网模型

3.2.3 负荷模型

馈线中不同位置分布有若干负荷，配电网中的负荷种类繁多，随机性大，较难准确地对负荷加以表示。为便于研究，本章中采用恒功率静态模型来表示馈线上各节点的负荷；同时，假设负荷三相对称；因电压等级较低，配电线路长度较短，三相线路间的互感也不予考虑；所有线路阻抗均折合到系统电压等级。

馈线的负荷按照导线的发热限制来确定。LGJ-150mm 线路的持续允许电流是 445A。持续输送容量由下式确定^[28]：

$$P_C = \sqrt{3}I_C U_N \quad (3-1)$$

式中 P_C ——持续输送容量，kVA； I_C ——持续允许电流，A； U_N ——线路额定电压，kV。

根据上式可计算得 LGJ-150mm 型架空线的持续输送功率为：

$$P_C = \sqrt{3}I_C U_N = \sqrt{3} \times 445 \times 10^3 = 7.7 \text{MVA}$$

配电网分别在两种不同负荷状况下进行仿真分析：

(1) 最大负荷：根据导线发热条件，取持续输送容量的 60% 为最大负荷。

$$P_{L_{\max}} = 4162.3 \text{MW}, Q_{L_{\max}} = 2015.9 \text{M var}, \cos \varphi = 0.9 \text{ 滞后}$$

(2) 最小负荷：取最大负荷的 30% 为最小负荷。

$$P_{L_{\min}} = 1248.7 \text{MW}, Q_{L_{\min}} = 604.77 \text{M var}, \cos \varphi = 0.9 \text{ 滞后}$$

配电网馈线平均分为 12 段，负荷平均分布在 1, 2, ..., 12 节点处。

3.2.4 带有分布式电源的配电网模型的建立

由于配电系统的基本单元是馈线，配电网的潮流计算一般不以全网为单位而是以馈线为单位，这样进行分析计算可以大大简化计算步骤，提高计算速度，因此配电系统的拓扑结构一般以馈线为单位，其过程如下：沿馈线将每一集中负荷视为一个节点并加以编号，从变电所的低压母线开始编号为 0，后面依次为 1, 2, 3, …… N。每一小段线路的阻抗和电抗分别为 R_i, X_i 。N 个负荷均匀的分布在线路的始端和末端，每个负荷大小为 $P_i + jQ_i$ 。形成的配电网馈线结构图如图 3-2 所示。

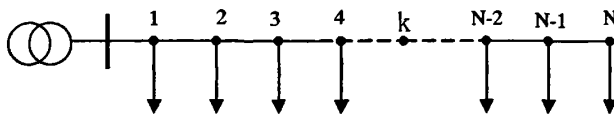


图 3-2 均匀配电网

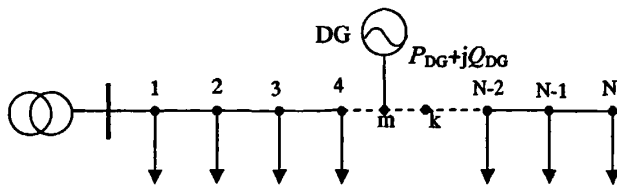


图 3-3 含有 DG 的均匀配电网

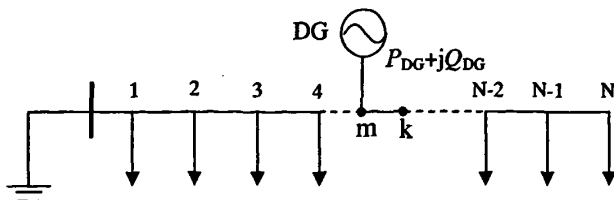


图 3-4 DG 单独作用的均匀配电网

设线路中有任一点 k，k 点之前的有功和无功负荷分别为：

$$\begin{cases} P_{0-k} = (k-1)P_1 \\ Q_{0-k} = (k-1)Q_1 \end{cases} \quad (3-2)$$

而 k 点之后的有功和无功负荷分别为：

$$\begin{cases} P_{k-N} = (N-k+1)P_1 \\ Q_{k-N} = (N-k+1)Q_1 \end{cases} \quad (3-3)$$

在上述配电线路中节点 m 处引入 DG，如图 3-3 所示，配电线路参数不变，DG 的大小为 $P_{DG}+jQ_{DG}$ 。

为了便于讨论 DG 的引入对配电线路造成的影响，以下考虑 DG 单独作用时的情况，由于系统电源等效为电压源，根据叠加定理将其短路，如图 3-4 所示。

3.3 电压分布简化算法—DG 叠加算法

根据所建模型，基于电路上的叠加原理，分别考虑系统电源和 DG 对配电线路的影响，把系统电源等效为电压源并将其短路，把 DG 等效为功率表示形式的电流源将其开路，以计算含有 DG 的配电线路上的电压分布。也就是将图 3-3 分为图 3-2 和图 3-4 来分析。

(1) 配电线路的电压计算

配电线路中任一点 k 处的电压损耗（近似等于电压降落的纵分量）为：

$$\Delta U_{S_k} = \Delta U_{S_{kv}} + \Delta U_{S_{km}} \quad (3-4)$$

其中， $\Delta U_{S_{kv}}$ 是由于 k 点之后的等效综合负荷引起的， $\Delta U_{S_{km}}$ 是 k 点之前的均匀负荷引起的。根据式(3-2)，(3-3)，可得

$$\Delta U_{S_{kv}} = k(N-k+1) \frac{r_0 P_1 + x_0 Q_1}{U_N} \quad (3-5)$$

设 r_0 、 x_0 分别为均匀配电网中相邻两个负荷节点之间的电阻和电抗值， U_N 为线路中的额定电压。

在计算负荷均匀分布线路的电压损耗时，均匀分布的负荷可用一集中负荷来代替，此集中负荷位于均匀负荷线路的中点，其大小等于线路上负荷的总和，所以有：

$$\Delta U_{S_{km}} = \frac{k}{2}(k-1) \frac{r_0 P_1 + x_0 Q_1}{U_N} \quad (3-6)$$

最后可得出，

$$\Delta U_{S_k} = \frac{k}{2}(2N-k+1) \frac{r_0 P_1 + x_0 Q_1}{U_N}, k \in [1, N] \quad (3-7)$$

(2) DG 单独作用时配电线路电压计算

根据图 3-4，因为系统电源侧短路，而线路中的阻抗相对于负荷来说很小，因此 DG 对电压损耗的作用在 DG 到系统这一段，即 m 点之前的线路。接入 DG 后，可能对电压有升高的作用，故在此处规定 DG 对电压的损耗为负。

在节点 1 到 m 之间的任一点 k 处的电压损耗为：

$$\Delta U_{DG_k} = -k \frac{r_0 P_{DG} + x_0 Q_{DG}}{U_N}, \quad k \in [1, m] \quad (3-8)$$

而对 m 点之后的线路，DG 对其没有直接影响，但是因其对 m 点电压的提高，从而间接影响了其后各点电压。相对于整条线路始端来说，负荷节点 m 之后的电压损耗为：

$$\Delta U_{DG_k} = -m \frac{r_0 P_{DG} + x_0 Q_{DG}}{U_N}, \quad k \in [m+1, N] \quad (3-9)$$

(3) 含 DG 的配电线路电压计算

利用叠加定理， $\Delta U_k = \Delta U_{S_k} + \Delta U_{DG_k}$ ，得电压损耗为

$$\Delta U_k = \begin{cases} \frac{k}{2}(2N-k+1)A - kB, & k \in [1, m] \\ \frac{k}{2}(2N-k+1)A - mB, & k \in [m+1, N] \end{cases} \quad (3-10)$$

设 u_0 为线路始端电压，假设为 1.05，则线路中任一点 k 处的电压为：

$$u_k = \begin{cases} u_0 - \frac{1}{2}k(2N-k+1)A + kB, & k \in [1, m] \\ u_0 - \frac{1}{2}k(2N-k+1)A + mB, & k \in [m+1, N] \end{cases} \quad (3-11)$$

其中，m 为 DG 的接入节点， $A = (r_0 P_l + x_0 Q_l) / U_N$ ， $B = (r_0 P_{DG} + x_0 Q_{DG}) / U_N$ 。

由式(3-11)可以看出 DG 容量，DG 接入位置会影响配电网电压分布，此外功率因数也是 DG 影响配电网电压分布的一个因素。对于某一条确定的线路来讲，当 DG 的容量和接入地点都确定时，A, B, N 和 u_0 都为定值，只需通过简单的一次运算即可获得电压分布。

下面对所提出的简化算法进行仿真验证其正确性。已知一条 10kV 配电线路，参数为：N=12, $r_0=0.064\Omega/\text{km}$, $x_0=0.147\Omega/\text{km}$ ，单个负荷的大小分别为 $P_l=415.56\text{kW}$, $Q_l=240\text{kVar}$ ，配电线路始端电压为 1.05， $U_N=1.0$ ， $S_B=10\text{MVA}$ ， $U_B=10\text{kV}$ 。根据叠加定理简化计算式(3-11)进行计算，将所得结果与潮流计算进行比较分析。

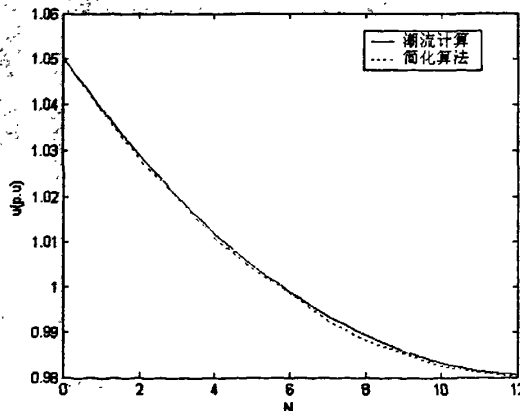


图 3-5 无 DG 作用时仿真验证图

(1) DG 未接入配电网时，潮流计算和简化算法电压分布曲线如上图 3-5:

(2) DG 分别位于不同节点处的简化算法与潮流计算的验证图如下图 3-6, 图 3-7:

DG 两种方式下即 $\begin{cases} 1. P_{DG} = 3MW, \cos\varphi = 0.9(\text{滞后}) \\ 2. P_{DG} = 2MW, \cos\varphi = 0.95(\text{滞后}) \end{cases}$ 运行的结果, 分别记为简化算法 1 和简化算法 2, 两种方式下所对应的潮流算法分别记为潮流算法 1 和潮流算法 2。

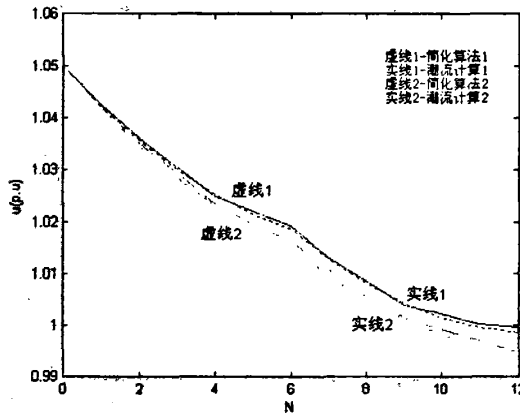


图 3-6 DG 在节点 6 处的简化算法与潮流计算验证图

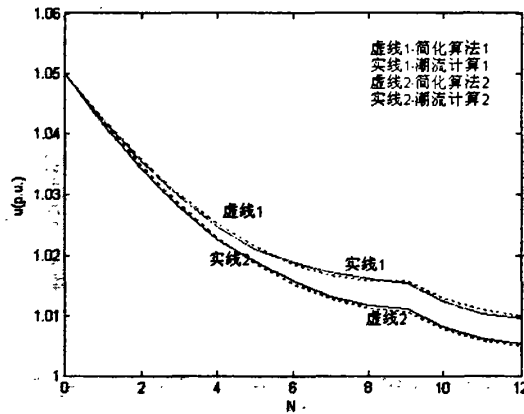


图 3-7 DG 在节点 9 处的简化算法与潮流计算验证图

经过以上图分析比较, 可以看出通过在不同接入地点和不同容量下的叠加定理简化计算结果和潮流计算结果相比较, 两者的结果较为一致, 证明了该叠加原理简化算法的正确性。此算法物理意义清晰, 计算简便, 准确性也较高, 易于实现。

3.4 理论分析

根据前面所述叠加定理算法的计算公式, 下面我们将对 DG 接入配电网后的电压分布进行定量的分析。

当 DG 接入配电网后的电压损耗的表达式为:

$$\Delta U_k = \begin{cases} \frac{1}{2}k(2N-k+1)A-kB, k \in [1, m] \\ \frac{1}{2}k(2N-k+1)A-mB, k \in [m+1, N] \end{cases}$$

当 $k \in [1, m]$ 时, 经整理得:

$$\Delta U_k = -\frac{1}{2}A \left(k - \left[N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A} \right] \right)^2 + \frac{1}{2}A \left(N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A} \right)^2 \quad (3-12)$$

其中, A, B 同前。

分析式(3-12), 当 $B \leq \left(N + \frac{1}{2} - m \right) A$ 时, ΔU_k 为 k 的单调递增二次函数, 且 $\Delta U_k \in \left[0, \frac{1}{2}Am \left(2N+1 - \frac{2B}{A} - m \right) \right]$, 即当 DG 提供的有功、无功小于其后负荷所需要的有功、无功时, DG 处电压为前段线路的最低点; 而当 $B > \left(N + \frac{1}{2} - m \right) A$, 在区间 $\left[0, N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A} \right]$ 上, ΔU_k 是单调递增的, 在区间 $\left[N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A}, m \right]$ 上是单调递减的, 此时, ΔU_k 的最大值为 $\frac{1}{2}A \left(N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A} \right)^2$, 即当 DG 提供的有功、无功大于其后负荷所需有功、无功时, 前段线路的最低点将不在 DG 处, 而在 $\left(N + \frac{1}{2} - \frac{B}{A} \right)$ 点处。

当 $k \in [m+1, N]$ 时, 经整理得:

$$\Delta U_k = -\frac{1}{2}A \left(k - \left[N + \frac{1}{2} \right] \right)^2 + \frac{1}{2}A \left(N + \frac{1}{2} \right)^2 - mB \quad (3-13)$$

分析式(3-13), 在区间 $[m+1, N]$ 上, ΔU_k 为 k 的单调递增二次函数, 对于 DG 之后的线路, 由于 DG 处的电压得到提高, 才使得各点电压分布比无 DG 时的电压分布有所提高, 最高点在 DG 处, 最低点在线路末端。

3.5 仿真结果分析

配电网是以用户端没有电源为基础设计的, 其潮流是从系统侧流向负荷侧的, 在接入分布式电源之后, 配电系统从放射状结构变为多电源结构, 潮流的大小和方向有可能发生巨大改变, 使配电网的稳态电压也发生变化, 因此必须评估分布式电源对电力系统电压的影响, 以保证在分布式电源应用越来越多的情况下它们不会给用户带来不良后果。

本文采用前面的设备参数进行仿真, 利用多个仿真算例来反映不同容量、不同地点、不同功率因数的分布式电源对配电网电压的影响电压基值取为 10kV。

当分布式电源接入配电网, 将对配电网的各部分产生不同影响。我们将 L_1 的节点 6 上接入一个容量为 4MW 分布式电源, 分两种情况进行仿真: 没有分布式电源

情况下，馈线 L_1 、 L_2 的电压分布；接入分布式电源，馈线 L_1 、 L_2 的电压分布，所得的电压曲线如图 3-8。

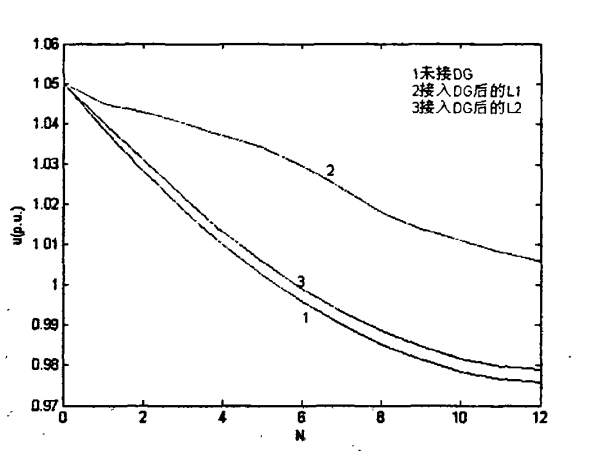


图 3-8 接入 DG 前后的馈线电压曲线

从图 3-8 可以看出，在没有分布式电源的支撑情况下，馈线末端节点的电压较为接近安全运行的下限。相反，当配电网中接有分布式电源时，线路上的电压有了较为明显的改善。对于接有分布式电源的馈线 L_1 ，馈线末端节点电压与不接分布式电源前相比有了进一步的提高。对于未接分布式电源的馈线 L_2 ，由于分布式电源将 L_1 的首端电压抬高，在同一变压器下的其他馈线 L_2 、 L_3 、 L_4 的电压曲线也有相应的提高，但是升高的程度比馈线 L_1 小。因此，在考察分布式电源对配电网电压的影响时，我们将会更加关注接有分布式电源的馈线电压的变化，以下仿真中考察的是接有分布式电源的 L_1 的电压曲线变化。

3.5.1 DG容量对电压曲线的影响

在不改变其他运行条件，只改变分布式电源容量时，分布式电源会给配电网电压带来影响。采用前述相同的网络数据和负荷大小，DG 容量分别取表 3-1 中的数据，功率因数均为 0.9（滞后），观察馈线电压变化的情况。

表 3-1 DG 容量值及其接入位置

曲线	1	2	3	4
DG 容量值(MW)	0	3	5	7
DG 接入地点	无 DG	6	6	6

以表 3-1 中的不同容量值进行仿真，得到的电压曲线如图 3-9 所示。

从仿真结果可以看出，随着分布式电源容量的逐渐增加，DG 上游馈线传输的功率减小，潮流逐渐减小， ΔU 减小，馈线电压逐渐减小；DG 下游馈线传输的功率基本不变，潮流也无较大变化， ΔU 不变，但是因 DG 将其所在节点的电压抬高，故下游馈线的电压整体升高。电压分布曲线如图 3-9 中的曲线 1、2。

随着 DG 容量的持续增大, DG 将向上游负荷提供功率, 出现逆向潮流, 在 DG 上游馈线出现电压升; 下游馈线负荷基本不变, 电压降变化不大, 但电压整体上升。此时最大电压出现在分布式电源所在节点。如图中的曲线 3、4。在图 3-9 中, 随着分布式电源容量的增大, 馈线电压曲线是逐步升高, 在所有电压分布曲线中曲线 4 最高。

在不改变 DG 接入位置的情况下, 电压支撑由 DG 的容量大小来决定, 容量越大, 电压支撑也越大, 整体电压水平就越高。当分布式电源大到一定的程度, 馈线电压曲线将超过供电电压偏差标准。

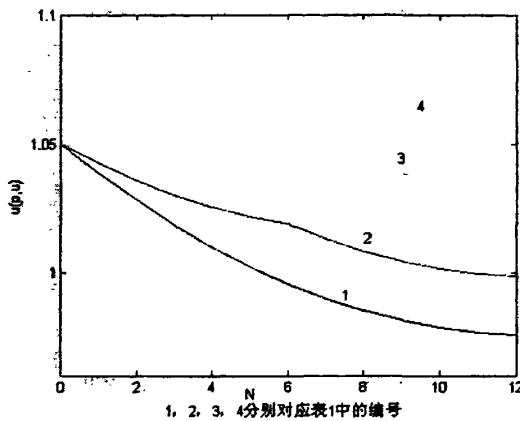


图 3-9 节点 6 处 DG 容量变化电压曲线图

3.5.2 DG 接入位置对电压曲线的影响

在不改变其他运行条件, 只改变分布式电源接入位置时, 分布式电源会给配电网电压带来影响。给定分布式电源容量 5MW 且以功率因数 0.9 运行, 分布式电源接入位置信息如表 3-2 所示。

表 3-2 DG 所在节点及对应的曲线值

曲线	1	2	3
DG 所在节点	3	6	9

按照表 3-2 中的值进行仿真, 可得到图 3-10 中所示的电压曲线。

观察图 3-10 可发现, 容量相同的分布式电源在不同的位置接入配电网, 得到的电压分布有着较大的差异。曲线 1 的 DG 位置比较接近系统母线, 而曲线 3 的 DG 位置较为接近线路末端, 可以看出, 当 DG 离系统母线越远, 馈线电压升的越高。当分布式电源容量较小时, 馈线最高电压出现在馈线首端; 当分布式电源容量较大时, 将在 DG 所在节点出现局部极大电压。如果位置选择不当, 分布式电源的电压支撑会使得某些节点的电压高于额定电压。分布式电源的总容量越大, 这些点的电压越高, 甚至高于送端系统母线电压。如果末节点的分布式电源退出运行, 线路末

端的电压变化幅度将过大。大量的仿真表明，如果较大容量的分布式电源接入在馈线中部，局部极大电压也就出现在线路中部。

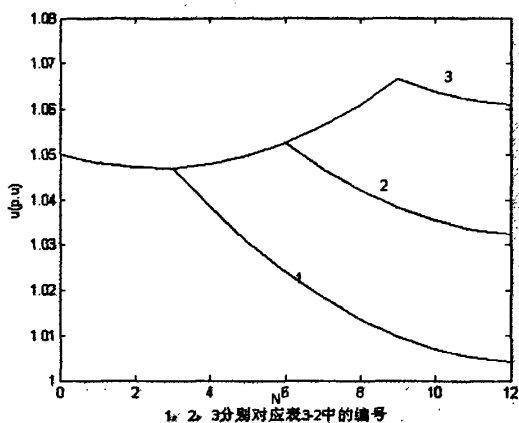


图 3-10 DG 位于不同节点处的电压曲线图

整个仿真中采用静态恒功率负荷，实际配电系统中有一定的动态负荷和无功调压设备。这些负荷或设备的无功需求随电压的变化而动态变化。分布式电源的接入和退出并不是简单的分布式电源出力的数字变化，实际情况会更加复杂。分布式电源并入系统使得电压被抬高；电压抬高的同时动态负荷的无功需求量会有所减少，电容补偿的无功也增多，这样系统中因分布式电源接入的净无功变化会多于分布式电源的无功出力。同样，一个部分依靠分布式电源支撑电压的配电线路，分布式电源的退出使得电压下降，动态负荷无功需求增加，电容发出的无功减少，这样配电线路中缺额的无功远远大于退出的分布式电源所发出的无功。

3.5.3 DG功率因数对电压曲线的影响

功率因数是分布式电源影响配电网电压的一个重要方面。某些分布式电源所采用的技术不允许进行功率因数控制，而另外一些分布式电源允许改变功率因数，可根据所需的任何功率因数进行发电，这需要看具体的分布式发电技术及其控制。从仿真结果看，分布式电源的功率因数对改变配电网电压有着重要影响。

给定分布式电源接入位置为节点 6、容量 5MW，分布式电源功率因数如表 3-3 所示，在各种功率因数下馈线电压曲线如图 3-11 所示。

表 3-3 DG 功率因数及其对应的曲线值

曲线	1	2	3	4	5
功率因数	0.9 (滞后)	0.95 (滞后)	1	0.9 (超前)	0.95 (超前)

在分布式电源的功率因数从超前 0.9 变化到滞后 0.9 的过程中，随着分布式电源吸收的无功功率减小，馈线潮流减小，分布式电源上游的电压降也不断减小，馈

线电压曲线上移。随着功率因数的进一步改变，分布式电源从吸收无功功率逐渐变为输出无功功率，线路的潮流将开始增加，在电源上游馈线出现电压升，线路的电压曲线继续上移。在此过程中存在一个功率因数值，它使得线路的潮流最小，电压降也最小，该功率因数值取决于负荷的功率因数以及分布式电源的功率与负荷功率的比值。

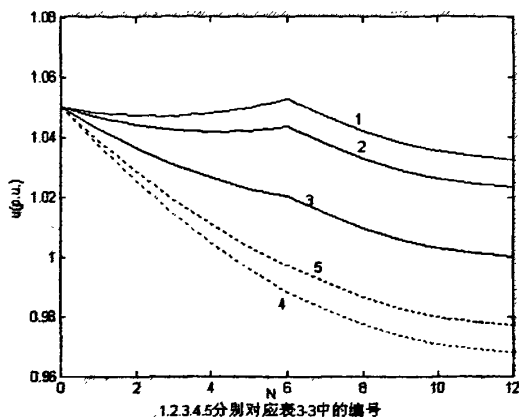


图 3-11 DG 不同功率因数下的电压曲线图

3.6 小结

电压维持在规定电压范围内才能保证电能质量。配电系统的调压规则是以潮流从变电站流向用户为基础的，但在分布式电源接入电网之后，配电系统从放射状结构变为多电源结构，潮流的大小和方向有可能发生较大改变，从而使电力系统中某些部分的电压也发生变化。本章通过建立配电网模型、负荷模型以及 DG 模型，提出了一种基于叠加原理的电压分布算法，结合多个仿真算例说明 DG 接入配电网后对电压造成的影响，得出如下结论：

- (1) 一定容量的 DG 接入配电网后，会对馈线上的电压分布产生一定的影响；
- (2) 接入节点一定的 DG，容量越大，提高电压的效果越明显；
- (3) 一定容量的 DG 越接近系统母线，对馈线电压分布的影响越小；其越靠近馈线的末端，对馈线电压的影响越大；
- (4) DG 以滞后功率因数运行时，DG 提供无功，使电压升高，而且功率因数越小，提供的无功则越大。而以超前功率因数运行时，将消耗无功，使电压降低，功率因数越小消耗的无功越大。

第四章 配电网中分布式电源的最优配置

4.1 引言

为了更有效地利用分布式电源，就需要在安全稳定的前提下尽可能合理的接入分布式电源，因此计算分布式电源的最优接入位置是需要考虑的问题。

分布式电源接入配电网中可以增加电网的稳定性，降低系统网损，改善电压分布和负荷功率因数，延缓系统的更新速度，以及增加电网可靠性和经济性等。研究表明，分布式电源的接入对于降低网损可以起到十分显著的作用。分布式电源在配网中的最优接入位置通常按使系统网损最低来确定：文献[29]提出了“2/3法则”来解决辐射形配网带有均匀负荷时的分布式电源最优配置问题，该方法简单易用，但不能用于解决辐射形配电网带其它负荷时的情况。文献[30]中以最大化 DG 有功输出为目标函数，解决一些 DG 接入系统所面临的问题。但该算法较简单，不能处理非线性的情况。在本章中为了研究分布式电源在配电网中的最优配置提出了一种综合优化分析法来进行分析^[31]，该方法中主要考虑分布式电源的接入位置和储能容量，忽略了经济因素和地理因素等。另外，负荷模型一般可分为恒定阻抗负荷模型、恒定功率负荷模型以及恒定电流负荷模型，在此采用恒电流负荷模型，并且考虑将配电网模型分为连续和离散解析模型，分别对其进行研究。

4.2 配电网模型

4.2.1 连续模型

为了简化分析，将配电线视为一均匀分布的参数线路，假设线路长度为 l ，只考虑线路阻抗，单位长度的阻抗为 $Z=R+jX$ ，忽略线路导纳；馈线上负荷近似连续，则可采用恒电流静态模型表示馈线负荷^[32]。如图 4-1 所示， $I_d(x, T_i), I_d(x, T_{i+1})$ 分别为 x 点处在 T_i, T_{i+1} 时段内的负荷电流密度，将馈线上负荷电流分布表示为距离的函数，可以得到线路上电流分布 $I(x, T_i)$ 。

馈线中电流分布由馈线负荷分布确定。由于负荷的时变性，馈线电流分布函数很难根据实时参数求出。通常可以根据负荷预测值或者以前的统计参数，依据一定的统计方法确定。因此，当馈线上不接入分布式电源时， x 点处在 T_i 时段的馈线电流为：

$$I(x, T_i) = \int_0^x I_d(x, T_i) dx \quad (4-1)$$

另外，可分别求得 x 点处馈线网损微增量、电压微增量分别为：

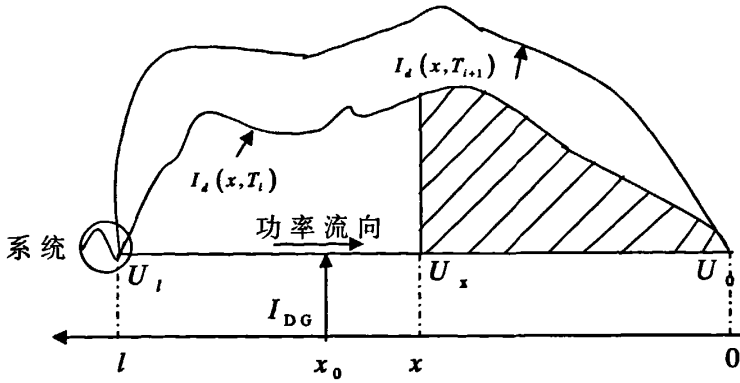


图 4-1 辐射型配电网馈线负荷分布

$$dP(x, T_i) = \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right)^2 R dx \quad (4-2)$$

$$dU(x, T_i) = \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right) Z dx \quad (4-3)$$

T_i 时段内馈线上总的功率损耗为:

$$P_{\text{loss}}(T_i) = \int_0^l dP(x, T_i) = \int_0^l \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right)^2 R dx \quad (4-4)$$

x 点到馈线末端的电压降为:

$$U_{\text{drop}}(x, T_i) = U_x(T_i) - U_0(T_i) = \int_0^x dU(x, T_i) = \int_0^x \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right) Z dx \quad (4-5)$$

x 点处的电压为:

$$U_x(T_i) = U_0(T_i) + U_{\text{drop}}(x, T_i) = U_l(T_i) - U_{\text{drop}}(l, T_i) + U_{\text{drop}}(x, T_i) \quad (4-6)$$

馈线上总的电压降为:

$$U_{\text{drop}}(l, T_i) = U_l(T_i) - U_0(T_i) = \int_0^l dU(x, T_i) = \int_0^l \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right) Z dx \quad (4-7)$$

4.2.2 离散模型

按照第三章所建立的配电网离散模型, 假设馈线可分成 N 段, 每段对应的阻抗为 Z_i , 将沿馈线每一段集中负荷视为一节点进行编号, 从变电所母线 0 开始, 依次为 1, 2, ..., N , 其相对应负荷节点从馈线上吸收的电流为 I_i , 根据线路负荷电流分布可得, 当没有分布式电源接入系统时, 各节点电压为:

$$U_n = U_0 - \begin{cases} \sum_{k=1}^n I_k \sum_{i=n+1}^k Z_i + \sum_{k=n+1}^N I_k \sum_{i=1}^n Z_i, 1 \leq n \leq N \\ \sum_{k=1}^N I_k \sum_{i=1}^k Z_i, n = N \end{cases} \quad (4-8)$$

此时线路的有功网损为：

$$P_{\text{loss}}^d = \sum_{k=1}^N R_k \sum_{i=1}^N |I_i|^2 \quad (4-9)$$

4.3 DG 在配电网中的最优布置算法

4.3.1 连续解析模型

将一台 DG 接入配电网馈线 x_0 处，即在 x_0 处接入电流源 $I_{\text{DG}}(T_i)$ 。由于 DG 的接入将影响到馈线电压分布，故沿馈线的电流分布也将发生变化。则馈线电流变为：

$$I(x, T_i) = \begin{cases} \int_0^x I_d(x, T_i) dx & 0 \leq x \leq x_0 \\ \int_0^x I_d(x, T_i) dx - I_{\text{DG}}(T_i) & x_0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (4-10)$$

相应的馈线功率损耗和电压降分别为：

$$P_{\text{loss}}(x_0, T_i) = \int_0^{x_0} \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right)^2 R dx + \int_{x_0}^l \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx - I_{\text{DG}}(T_i) \right)^2 R dx \quad (4-11)$$

$$U_{\text{drop}}(x, T_i) = \begin{cases} \int_0^x \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right) Z dx & 0 \leq x \leq x_0 \\ \int_0^{x_0} \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx \right) Z dx + \int_{x_0}^x \left(\int_0^x I_d(x, T_i) dx - I_{\text{DG}}(T_i) \right) Z dx & x_0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (4-12)$$

在给定时段 T 内，馈线上的平均功率损耗为：

$$\overline{P_{\text{loss}}(x_0)} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_i} P_{\text{loss}}(x_0, T_i) T_i \quad (4-13)$$

其中， N_i 代表时段 T 内所分的时间间隔数量； $T = \sum_{i=1}^{N_i} T_i$ 。

为使分布式电源接入后馈线上总的平均功率损耗最小且使馈线上各处电压 U_x 保持在一定范围内 ($1 \pm 0.05 p.u.$)，可以确定目标函数为：

$$\frac{d \overline{P_{\text{loss}}(x_0)}}{dx_0} = 0 \quad (4-14)$$

通过求解上式可得出解 x_0 即为单台 DG 接入后馈线功率损耗最小的最优布置位置。

下面考虑有 N 台相互独立的 DG 接入配电网的 $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}$ 处，各台 DG 的注入电流分别为 $I_{\text{DG}(1)}, I_{\text{DG}(2)}, \dots, I_{\text{DG}(N)}$ 。同样，不考虑 DG 的接入对负荷电流分布的影响，则此时沿线路的电流分布因多台 DG 的接入将变为：

$$I(x, T_i) = \begin{cases} \int_x^l I_d(x, T_i) dx - \sum_{i=1}^N I_{DG}(T_i) & 0 \leq x \leq x_{(1)} \\ \int_x^l I_d(x, T_i) dx - \sum_{i=2}^N I_{DG}(T_i) & x_{(1)} \leq x \leq x_{(2)} \\ \vdots & \vdots \\ \int_x^l I_d(x, T_i) dx & x_{(N)} \leq x \leq l \end{cases} \quad (4-15)$$

同理，可计算出整条馈线有功损耗为：

$$P_{\text{loss}}(x, T_i) = \int_0^{x_{(1)}} \left[I_d(x, T_i) - \sum_{j=1}^N I_{DG}(T_j) \right]^2 R dx + \dots + \int_{x_{(i)}}^{x_{(i+1)}} \left[I_d(x, T_i) - \sum_{j=1}^N I_{DG}(T_j) \right]^2 R dx + \dots \quad (4-16)$$

将上式对 DG 的安装位置求偏导，可得

$$\frac{dP_{\text{loss}}(x, T_i)}{dx_{(i)}} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (4-17)$$

联立式(4-17)求出所有方程，求解方程组可得出多个 DG 在配电网中的最优布置位置。

4.3.2 离散解析模型

在离散解析模型情况下，将一台 DG 接入馈线的第 k 负荷节点处，注入电流为 I_{DG} ，假设 DG 的接入对负荷电流分布没有影响，根据线路电压降落，可得沿馈线各点电压分布为：

$$U_n = U_0 - \begin{cases} \sum_{k=1}^n I_k \sum_{i=1}^k Z_i + \sum_{k=n+1}^N I_k \sum_{i=1}^n Z_i - I_{DG} \sum_{i=1}^n Z_i & 1 \leq n < k \\ \sum_{k=1}^n I_k \sum_{i=1}^k Z_i + \sum_{k=n+1}^N I_k \sum_{i=1}^n Z_i - I_{DG} \sum_{i=1}^k Z_i & k \leq n < N \\ \sum_{k=1}^N I_k \sum_{i=1}^k Z_i - I_{DG} \sum_{i=1}^k Z_i & n = N \end{cases} \quad (4-18)$$

同样可得馈线总有功损耗为：

$$P_{\text{loss}}^d = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k-1} R_i \left[\sum_{n=i}^N I_n - I_{DG} \right]^2 + \sum_{i=k}^N R_i \left[\sum_{n=i}^N I_n \right]^2 & 1 < k < N \\ \sum_{i=1}^k R_i \left[\sum_{n=i}^N I_n - I_{DG} \right]^2 & k = N \end{cases} \quad (4-19)$$

通过数值计算方法进行计算，便可求取使有功损耗最小值的 DG 的最优安装位置。

同理，若考虑 M 台 DG 接入到馈线中，位于馈线的 k_1, k_2, \dots, k_m 负荷节点处，各

台 DG 的注入电流分别为 $I_{DG(1)}, I_{DG(2)}, \dots, I_{DG(M)}$ 。此时馈线的有功网损为：

$$P_{loss(M)}^d = \sum_{k=1}^{k_1} R_k \left[\left| \sum_{i=k}^N I_i - \sum_{i=1}^M I_{DG(i)} \right| \right]^2 + \sum_{k=1}^{k_2} R_k \left[\left| \sum_{i=k}^N I_i - \sum_{i=1}^M I_{DG(i)} \right| \right]^2 + \dots + \sum_{k=1}^{k_{k_1}} R_k \left[\left| \sum_{i=k}^N I_i - \sum_{i=1}^M I_{DG(i)} \right| \right]^2 + \dots \quad (4-20)$$

与一台 DG 接入到离散模型表示的配电网中的情况类似，为求得多台 DG 的最优安装位置，同样可通过数值计算方法，比较求取使有功网损最小的安装位置。

4.4 DG 在配电网中的最优配置仿真计算

4.4.1 安装位置限制及算法流程图

根据上一节中所求得的分布式电源接入后馈线功率损耗最小的接入位置，但它不能保证馈线上各处电压不能越限。如果馈线电压越限，可以在该接入位置 x_0 点附近接入 DG，在最大可能减小网损的同时来调整馈线电压。

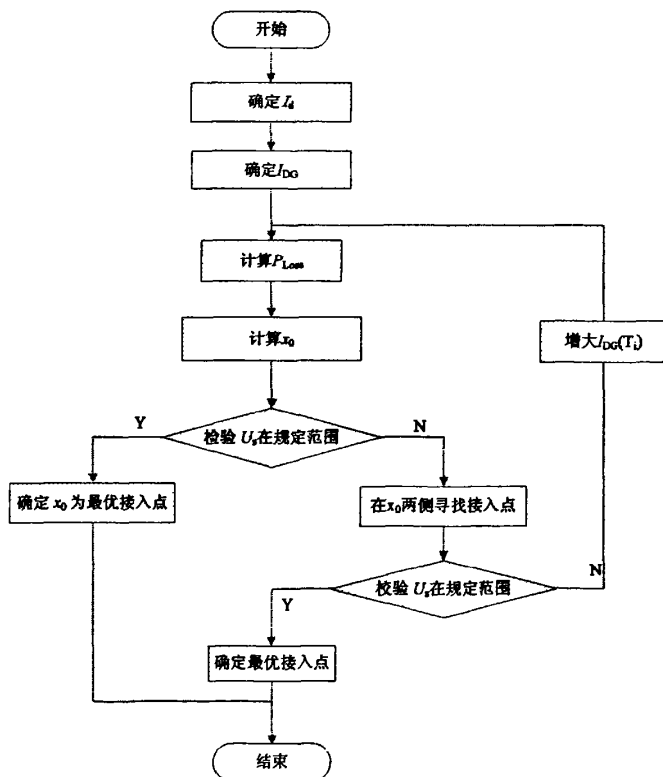


图 4-2 DG 在辐射型配电网中的最优接入点分析计算流程

确定分布式电源在辐射式配电网中的最优接入点分析步骤如下：

(1) 针对连续和离散系统模型，根据配电网数据，按照统计规律确定沿馈线负荷电流分布规律 $I_d(l)$ ；若有分支馈线，则对其进行等效处理；

- (2) 根据系统给定参数，确定各台 DG 的输出电流 I_{DG} ;
- (3) 根据式(4-13)或(4-19)求出含多台 DG 的馈线网损 P_{loss} ;
- (4) 根据式(4-17)求出网损对各台 DG 安装位置的灵敏度，形成方程组，求出各台 DG 的最优安装位置 x_0 ；若是离散情况，利用式(4-20)可根据数值算法，通过编程比较，求得最优安装点；
- (5) 若馈线电压不越限，则 x_0 点就是分布式电源的最优接入位置；
- (6) 若馈线电压越限，则将分布式电源在 x_0 点附近接入，校验 x_0 点附近是否存在一个接入位置使馈线电压不越限；
- (7) 如果 x_0 点附近没有能使馈线电压不越限的接入位置，则增大分布式电源接入容量，重复步骤(2)~(7)。

4.4.2 算例分析

下面通过一个离散模型算例检验上述分析和计算方法。为简化计算过程，在此不考虑电压分布限制；同样，由于复数计算的复杂性，只考虑馈线有功负荷电流分布情况且 DG 也只提供有功。图 4-3 所示为典型的辐射形配电网接线图，系统负荷为恒功率负荷。系统参数如表 4-1 所示。

表 4-1 典型辐射型配电网系统参数

分段线路参数 (Ω)	各母线电压 (kV)	各母线负荷 (MW)	DG 容量 (MW)
$R=0.525, X=1.0$	10.0	0.5	5.5

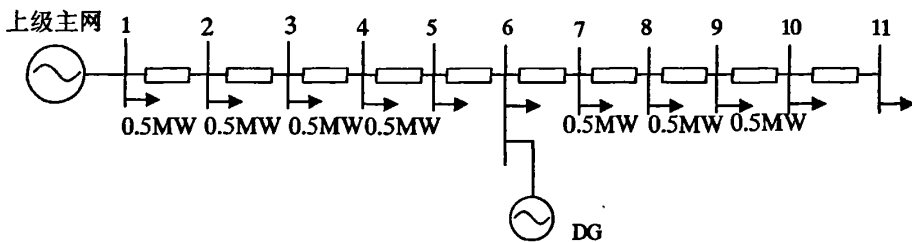


图 4-3 典型辐射型配电网接线图

首先，计算不接入分布式电源时的系统损耗；然后，将分布式电源依次接入 1~11 号母线，在每种情况下计算系统损耗。这样可得系统损耗情况见下表 4-2 所示：

表 4-2 系统损耗仿真结果表

DG 接入节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	无 DG
系统损耗(MW)	0.621	0.515	0.343	0.228	0.163	0.137	0.144	0.179	0.240	0.326	0.441	0.796

系统损耗仿真计算结果的对比示意图如图 4-4 所示，其中，横坐标 1~11 代表分布式电源接入母线位置，横坐标 12 代表分布式电源未接入配电网中；纵坐标代表

在不同状态下的系统损耗。

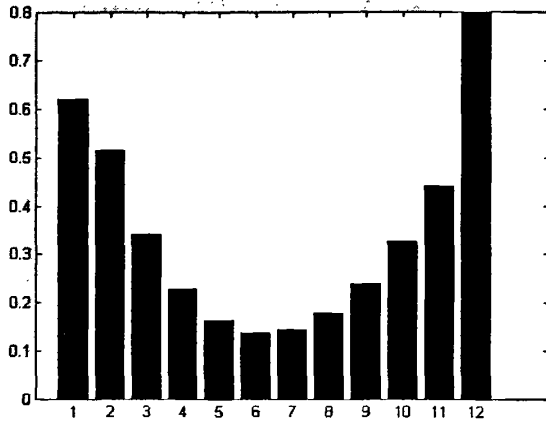


图 4-4 系统损耗仿真计算对比示意图

从以上仿真结果可以看出，当分布式电源接入母线 6 时，系统损耗最小。此时的系统电压水平如表 4-3 所示：

表 4-3 DG 接入母线 6 时系统电压水平

接入 母线	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
电压 水平 (p.u.)	1.000	0.998	1.002	1.005	1.014	1.026	1.011	0.999	0.990	0.986	0.984

由表 4-3 可见，分布式电源接入母线 6 时，系统中各母线电压维持在规定范围内 ($1 \pm 0.05 p.u.$)。

仿真分析结果表明：分布式电源接入点是 6 母线。通过前面章节中确定分布式电源在辐射形配网中的最优接入点分析步骤分析得出的最优接入点也是 6 母线，计算结果与仿真结果吻合。通过理论计算和仿真验证可以发现：在辐射形配网中，当分布式电源未接入电网时系统损耗最大；当分布式电源接入位置从分析得到的最优接入点向两侧依次移动时，系统损耗逐渐增大。

4.5 小结

根据辐射形配电网连续解析模型和离散模型，研究了多台 DG 装置接入系统对沿线电压和有功网损的影响。讨论了 DG 安装在离散模型及连续模型配电网中的优化方法以及 DG 对电压分布的影响和其安装位置的限制。在最小化沿线网损时，本章提出的方法能够满足 DG 接入系统的计算要求，同时能求出离散配电网并入 DG 的情况。通过仿真验证了此算法的正确性，在给定的条件下可以有效减小有功网损，改善线路电压分布，对提高系统运行的经济性和改善电压分布可起到良好的作用。

第五章 分布式电源并网后的电压调整

5.1 引言

分布式电源并入配电网后会使馈线电压升高,当分布式电源退出运行时,对于依靠分布式电源支撑电压的馈线又有低电压的电能质量问题。因此需要保证分布式电源在投入和退出运行的情况下,配电网馈线电压都能够满足供电要求,必须考虑调压^[33-34]。利用改变变压器变比进行调压,对于各种分布式电源接入情况,并不满足调压要求,并且调压效果不理想。因此需要采用新的调压手段,本章采用新型静止无功补偿装置(Advanced Static Var Generator ,ASVG)与 DG 配合调节配电网电压。

5.2 电压调整原则

1 电压调整

由负荷的电压静态特性研究可知,无功负荷变化引起的电压波动远较有功负荷的影响大。城市电网普遍存在电压偏低或过高问题,其原因除了电网结构不合理和导线过细外,主要是由于无功电源不足或过剩,所以必须采取有效的调压措施,以提高电压水准。调压措施包括无功补偿和无功的合理分配。

2 电压调整的措施

(1) 配电网电压调整的综合措施:

- 1) 无功就地平衡;
- 2) 充分利用改变发电机的端电压和变压器分接头进行调压;
- 3) 在高峰和低谷负荷时,保证线路末端电压偏移在允许范围内。

3 各种调压方法的比较和应用^[35]

电压调整是个比较复杂的问题,因为整个系统每个节点的电压都不相同,运行条件也有差别。因此,电压调整要根据系统具体情况,选用合适的方法,才能达到目的。

发电机调压是各种调压手段中首先被考虑的。因为它不需要附加设备,从而不需要附加投资,而是充分利用发电机本身具有发出或吸收无功功率的能力。发电机不仅是有功电源,也是无功电源,有些发电机还能通过进相运行吸收无功功率,所以可用调整发电机端电压的方式进行调压。这是一种充分利用发电机设备,不需额外投资的调压手段。现在同步发电机都装有自动励磁调节设备,其主要功能是自动调整发电机的机端电压、分配无功功率以及提高发电机同步运行的稳定性。按规定,发电机可以在其额定电压的 95%~105%范围内保持以额定功率运行。

对于发电机直接供电的负荷，如果供电线路不长、电压损耗不大，通过发电机调压就能满足负荷的电压要求。但如果通过多级变压供电，仅用发电机调压，往往不能满足负荷电压的要求。而且发电机要照顾近处的地方负荷，电压不能调得过高，所以远处负荷的电压调整，还要靠有载调压变压器等其他调压措施来解决。

在无功功率不足的系统中，首要的问题是增加无功功率补偿设备，而不能只依靠调压变压器分接头的方法。通常，大量采用并联电容器作为无功补偿设备只是在有特殊要求的场合下，才采用静止补偿器与同步调相机。静止补偿器是一种性能良好、维护方便的新型补偿装置，在价格相当条件下，应优先选用。对于 500kV、330kV 及部分 220kV 线路，要装设足够的感性无功补偿设备，以防止线路轻载时充电功率过剩引起的电网过电压。

在无功电源充裕的系统中，应该大力推广和采用有载调压变压器，这是在各种运行方式下保证电网电压质量的关键手段之一。有载调压的优点是^[36-37]：能带负载调压；调压速度快，每调换一级电压约 3~6s；开关可手动、电动操作，也能远方电动操作，便于实现自动化管理；调压范围较大，一般为 15% 以上。但有载调压的开关和变压器结构比无励磁调压的复杂，制造工时和材料增多，成本较高。

改变电力网的导线截面、改变电网的接线方式、改变并列运行的变压器的台数、用串联电容器等都是改变网络参数进行调压的方法。增大导线截面，可以减少电压损耗，但这个方法仅在负荷功率因数提高，原有导线截面很小的配电线路中才较有效，在输电线路中采用这种方法收益甚小。改变电力网的接线方式，可通过切除或投入双回路中的一条线路，切除或投入变电所中一部分并列运行的变压器等方法来实现。但这两种方法，只有在在不显著增加功率损耗和降低可靠性时，才可以作为辅助的调压措施^[38]。

4 供电电压偏差^[39]

供电电压偏差是电能质量的一项指标。合理确定该偏差对于电气设备的制造和运行，对于电力系统的安全和经济都有重要意义。允许的电压偏差较小，有利于供电设备的安全和经济运行，但为此要改进电网结构，增加无功电源和调压装备，同时要尽量调整用户的负荷。另一方面，供用电设备的允许偏差也反映了设备的设计原则和制造水平。允许电压偏差越大，要求设备对电压水平变化的适应性强，这需要提高产品性能，往往要增加设备的投资。对于一般的电工设备，电压偏差超出其设计范围时，直接影响是恶化运行性能，并会影响其使用寿命，甚至使设备在短时间内损坏；间接影响是可能波及相应的产品生产质量和数量。因此，电压允许偏差标准的确定是一个综合的技术经济问题。

按 GB 规定，10kV 及以下电压供电的偏差为 $\pm 7\%$ 。为了提高供电可靠性，本文中认为 10kV 三相供电电网的电压允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

5.3 DG 并网后改变变压器变比调压

改变变压器变比在配电系统中是较为常见的调压措施。通常通过改变变压器的变比来保证供电电压偏差在 $\pm 5\%$ 的范围内。现在以 3MW、功率因数 0.95 滞后运行的分布式电源连接在馈线 L_1 的节点 6 上，改变变压器变比调压为例，如下图 5-1。

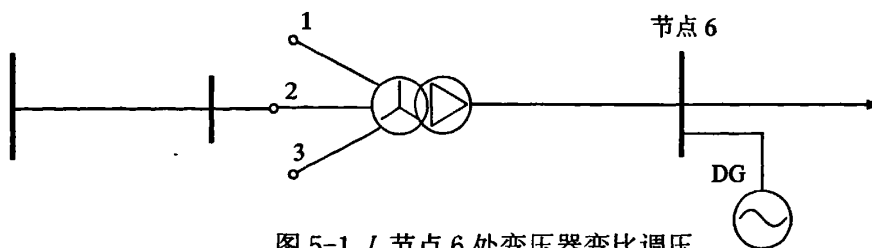


图 5-1 L_1 节点 6 处变压器变比调压

馈线 L_1 、 L_2 在变压器变比改变前后的电压曲线如图 5-2 所示。当分布式电源并入配电网后，分布式电源所在节点 6 的电压达到 1.0525p.u.，超过供电电压偏差。经过变压器调压后，分布式电源所在节点 6 的电压降低到 1.0414p.u.，满足电压偏差 $\pm 5\%$ 的要求。

对于同一变压器下其他馈线电压，在分布式电源并网后，馈线 L_2 的电压范围在 1.0500~0.9847p.u.；在变压器调压之后，馈线 L_2 的电压范围是 1.0500~0.9804p.u.，仍然满足供电电压偏差的要求。

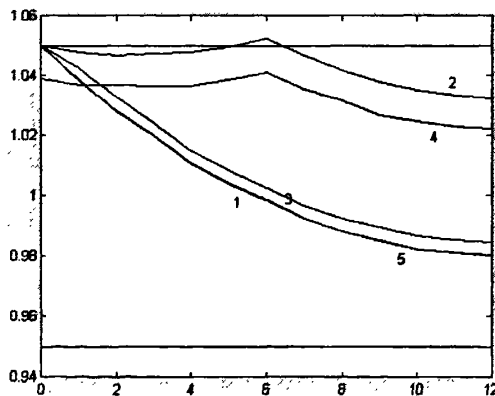


图 5-2 改变变压器变比调压

曲线 1: 未接入 DG

曲线 2: 调压前的 L_1 曲线 3: 调压前的 L_2

曲线 4: 调压后的 L_1 曲线 5: 调压后的 L_2

在改变变压器变比进行调压的同时，需要注意不能对系统母线下的其它馈线电压造成超出电压偏差的影响。对于无分布式电源的馈线 L_2, L_3, L_4 来说，改变变压器分接头会使其电压曲线下降，有可能超出电压允许的范围。另外在分布式电源退出

运行后，变压器分接头的改变会使得系统母线电压下降，有可能会低于电压允许范围。

对于分布式电源的某些并网情况，利用改变变压器变比调压不一定满足调压要求。仍然以 3MW,功率因数 0.95 滞后运行的分布式电源连接在馈线 L_1 的节点 12 上，改变变压器变比调压为例，馈线 L_1 、 L_2 在变压器变比改变前后的电压曲线如图 5-3。如图所示，当分布式电源并入电网后，分布式电源所在馈线 L_1 节点 12 的电压达到 1.1349p.u.，超过供电电压偏差。在经过变压器调压后，分布式电源所在节点 12 的电压降至 1.1184p.u.，不满足电压偏差 $\pm 5\%$ 要求。对于同一变压器下其他馈线电压，在分布式电源并网后，馈线 L_2 的电压在 1.0328~1.1184p.u. 范围内；在变压器调压之后，馈线 L_2 的电压在 0.9613~1.0500p.u. 范围内，满足供电电压偏差要求。

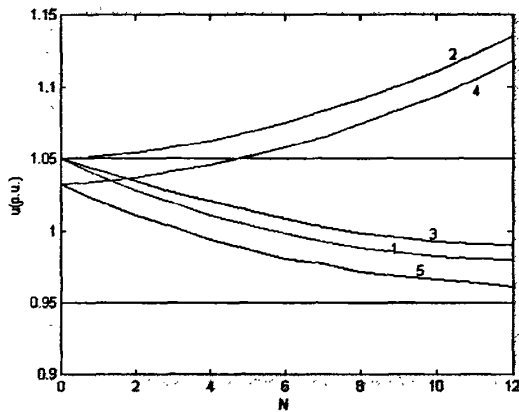


图 5-3 变压器分接头调压

曲线 1: 未接入 DG
 曲线 2: 调压前的 L_1 曲线 3: 调压前的 L_2
 曲线 4: 调压后的 L_1 曲线 5: 调压后的 L_2

改变变压器变比这种调压措施，对于分布式电源并网，在某些情况下可行，在某些情况下行不通。这种调压手段不适用于所有的并网运行情况。

5.4 新型静止无功发生器-ASVG

5.4.1 ASVG基本原理

ASVG 的基本原理就是将自换相桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。它是柔性交流输电系统(FACTS)元件的一种，主要利用大功率门极可关断晶闸管(GTO)构成的逆变桥为主电路，并通过其控制系统达到对电力系统的电压、无功、暂态稳

定等控制作用。ASVG 的运行原理见图 5-4。

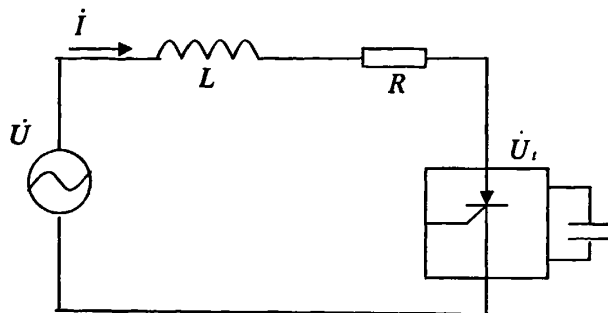


图 5-4 ASVG 的运行原理图

5.4.2 ASVG 数学模型的建立

ASVG 的数学模型为：

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_0 & -\frac{K}{L} \cos \delta \\ -\omega_0 & -\frac{R}{L} & -\frac{K}{L} \sin \delta \\ \frac{3K}{2C} \cos \delta & \frac{3K}{2C} \sin \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

其中 ω_0 为 d - q 坐标系的旋转角频率，与三相系统电压角频率相同； K 为逆变器调制比； R 、 L 分别为 ASVG 的等值电阻和电感； C 为 ASVG 直流侧电容值； δ 为 ASVG 输出电压与系统电压之间的相角差， u_s 为系统电压， u_{dc} 为直流电容电压。

由于 ASVG 必须具备多种功能，因此 ASVG 控制器的控制算法应该有多种，可根据需要选择使用。有电压控制算法，无功功率控制算法、PSS 算法、神经网络算法等。图 5-5 为 ASVG 的一种非线性 PI 电压控制算法传递函数框图。

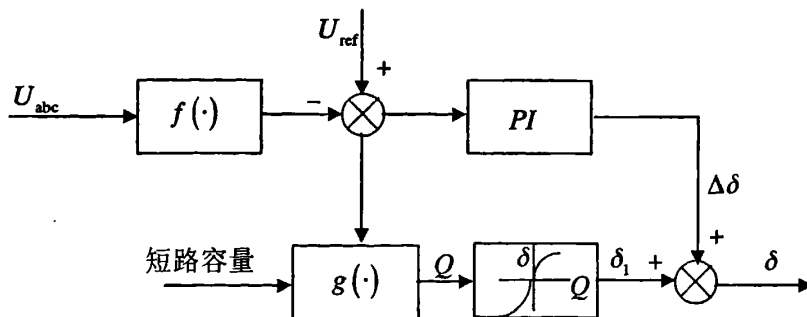


图 5-5 PI 逆系统电压控制框图

实际的 ASVG 是由许多子系统构成的，将 ASVG 所有子系统的物理模型全都建立起来是相当复杂的，而且在研究 ASVG 对系统的控制作用及动态特性的影响时，

即做 ASVG 系统级的仿真时，不用按实际的 ASVG 接线来建模，此时可根据 ASVG 的数学模型来建立 ASVG 的仿真模块。也就是按照数学建模方法来建立 ASVG 的仿真模型。按照数学建模构建的控制系统(如图 5-5 所示)的仿真模型如图 5-6，可利用 SIMULINK 的封装功能将图 5-6 所有的模块封装成一个控制模块。其输入 ASVG 接入点处系统三相电压，输出为 δ 角及电压瞬时有效值 U_s 。

对用数学模型表示的 ASVG，可以利用 SIMULINK 中的 S—函数编写数学模型的内部算法，然后再利用 SIMULINK 的封装产生一个 S 函数文件相对应的对话框和模块图标，建立一个能和 SIMULINK 模块库中的模块一起使用的新模块。该仿真模型的输入为系统电压的瞬时有效值 U_s 和 δ ，输出为 ASVG 的三相电流。为将该模块与电力系统连接起来，必须在三相输出电流后连接三个“controlled current source”模块。这样，ASVG 的仿真模型就建立起来了。

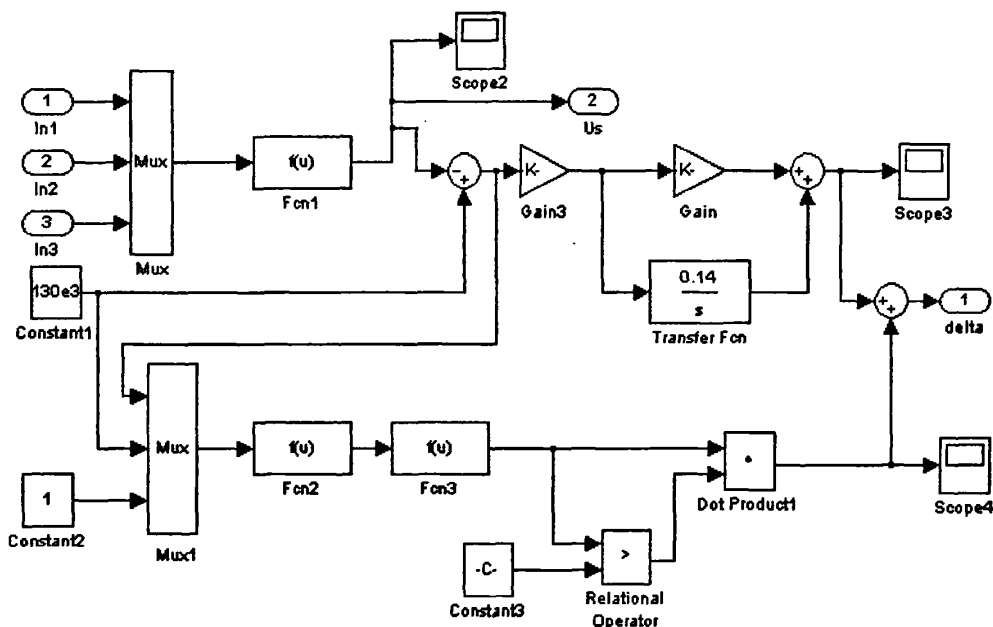


图 5-6 MATLAB 下的 ASVG 控制系统

5.4.3 ASVG的特点

根据 ASVG 的电压—电流特性图，如图 5-7 所示。同晶闸管控制电抗器 TCR 等传统静止无功补偿器 SVC 装置一样，改变控制系数的参数可以得到的电压—电流特性上下移动。但是可以看出，与图 5-8 所示的传统 SVC 电压—电流特性不同的是，当电网电压下降，补偿器的电压—电流特性向下调整时，ASVG 可以调整其变流器交流侧电压的幅值和相位，以使其所能提供的最大无功电流 I_{Lmax} 和 I_{Cmax} 维持不变，仅受其电力半导体器件的电流容量限制。而对传统的 SVC，由于其所能提供的最大

电流分别受其并联电抗器和并联电容器的阻抗特性限制，因而随着电压的降低而减小。因此 ASVG 的运行范围比传统 SVC 大，SVC 的运行范围是向下收缩的三角形区域，而 ASVG 的运行范围是上下等宽的近似矩形的区域。这是 ASVG 优越于传统 SVC 的一个特点。

由图 5-7 可见，ASVG 既能提供容性补偿，也可提供感性补偿，且其过载能力与系统电压无关。即是说，ASVG 能够在任何系统电压下提供纯容性电流。而由可控硅开关控制的电容器和电抗器组成的 SVC 提供的电流将会随着系统电压的降低而减小，其值由最大等值电容的允许值决定。所以 ASVG 在提供电压支持上优于 SVC。另一方面，ASVG 在容性和感性区域的暂时过负载能力均高于 SVC，其值取决于半导体元件的特性和装置运行时联结点温度。而 SVC 由于受最大容性电流的限制而很难提高其暂态无功能力，该电流值取决于电容器的大小和系统电压的大小。这些特性使得 ASVG 能够有效地提高电力系统的暂态稳定性。

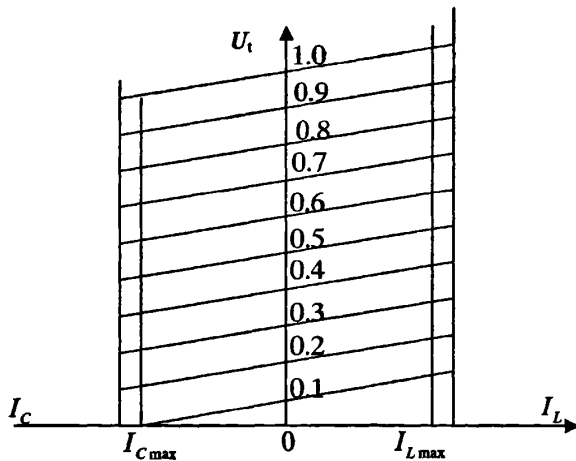


图 5-7 ASVG 电压—电流特性图

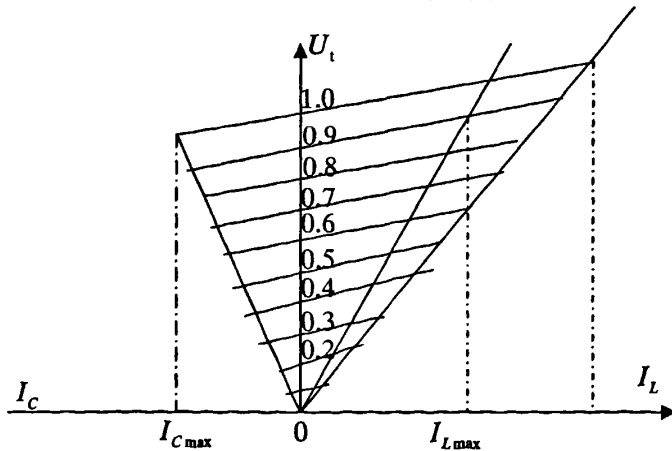


图 5-8 SVC 电压—电流特性图

此外对于那些以补偿输电为目的的 ASVG 来讲, 如果直流侧采用较大的储能电容, 或者其他的直流电源 (蓄电池组), 则 ASVG 还可以在必要短的时间向电网提供一定量的有功功率。这对于电力系统是非常有益的, 而又是传统的 SVC 装置望尘莫及的。

至于传统的 SVC 装置中令人头痛的谐波问题, 在 ASVG 中则可以采用脉宽调制 PWM 波调制技术, 已消除较低次的谐波, 并使高次谐波电流可以减小到可以接受的地步。应该指出的是, ASVG 接入电网的连接电抗, 其作用是滤除电流中可能存在的较高次谐波, 另外起到将变流器和电网这两个交流电压源连接起来的作用, 因此所需的电感值也并不大, 也远小于补偿容量相同的 TCR 等 SVC 装置所需的电感值。如果使用降压变压器将 ASVG 连入电网, 则还可以利用降压变压器的漏抗, 所需的连接电抗器将进一步减小。

5.5 ASVG 调压

5.5.1 DG 并入配电网后的 ASVG 调压

从前面的仿真结果可以看出, 分布式电源将使馈线电压升高, 而分布式电源所在节点电压改变最大, 因此我们将 ASVG 装设在分布式电源所在节点。利用新型静止无功补偿器调压, 从仿真结果来看其是否具有较为良好的调压效果, 对于分布式电源各种并网情况下尤其是在最优配置下的调压是否都能满足供电电压偏差要求。

下图 5-9、5-10 分别是最大负荷下, 5MW、10MW 分布式电源以表 5-1 中各种位置接入配电网中, 利用新型静止无功补偿器调压后的电压曲线。

表 5-1 分布式电源节点位置信息

编号	1	2	3	4
DG 所在节点	3	6	9	12

以 5MW 分布式电源接入配电网为例, 如图 5-9 所示, 分布式电源在馈线上以不同位置接入配电网, 在利用静止无功补偿器进行调压后, 都能使分布式电源所在节点的电压大幅下降, 在此基础上馈线电压曲线也大幅下降, 使得馈线电压在电压偏差 $\pm 5\%$ 范围内。表 5-2 是 5MW 分布式电源在 ASVG 调压前后, 分布式电源所在节点的电压比较。

表 5-2 调压前后分布式电源节点电压值

DG 位置	3	6	9	12
调压前	1.0481	1.0573	1.0635	1.0752
调压后	1.0368	1.0361	1.0291	1.0289

对于 10MW 的分布式电源在各种位置下接入配电网, 仍利用 ASVG 进行调压, 调压效果仍然比较明显, 如下图 5-10。馈线电压与没有进行 ASVG 调压前有了很大

的变化，整条馈线的电压尤其是分布式电源所在节点电压有了明显的降低，馈线电压能够满足供电电压偏差许可，而且馈线首端节点的电压变化不是很大，对于同一系统母线下的其他馈线，影响不是很大，也能满足供电电压偏差范围。

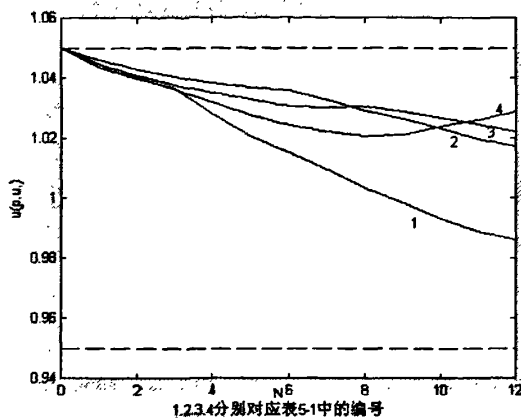


图 5-9 5MW 时的 ASVG 调压曲线

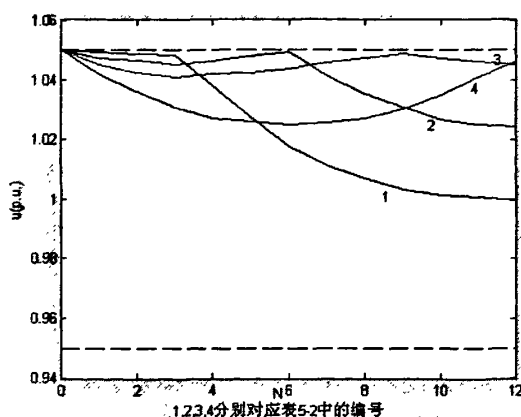


图 5-10 10MW 时的 ASVG 调压曲线

5.5.2 DG退出配电网后的ASVG调压

在分布式电源退出配电网之后，配电网的电压将有所降低。此时用 ASVG 来支撑电压，仍然具有较好的调压效果。图 5-11 是分布式电源退出运行后，按照表 5-3 中信息，由 ASVG 调压的馈线电压分布。

表 5-3 分布式电源节点位置信息

曲线	1	2	3	4	5
DG 所在位置	无 DG	3	6	9	12

如上图 5-11 所示，当分布式电源退出运行时，馈线电压大幅下降，如图中曲线 1。利用 ASVG 调压之后，馈线电压有较大的提高，有利于配电网的正常运行。

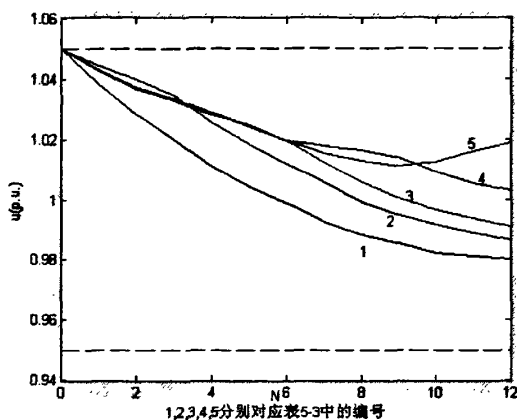


图 5-11 DG 退出运行时的 ASVG 调压曲线

由以上分析可以看出，分布式电源和 ASVG 协调工作，优化配置调节电压。表明在含有分布式电源的配电网中，通过 ASVG 调压可以治理因分布式电源并网引起的电能质量问题，使较为敏感的负荷电压较为稳定。

此外分析到 DG 接入电网后，对调相机的调压效果不会带来负面影响。因为调相机在自动化调节装置性能较高的运行条件下，它既能过激运行发出无功，又能欠激运行吸收无功功率，运行灵活，调压范围大，一般布置在网络的中枢点，则不会因 DG 的接入而影响它的调压效果。

总之，DG 接入电网是可行的，它会给电力系统负荷提供电源保障，又能减小网络损耗，尤其对波动性负荷，DG 的接入能提高电网的稳定性，给电网带来积极的影响。

5.6 小结

在接入分布式电源之后的馈线电压与原来的电压曲线不同。只通过改变变压器变比调节 DG 引入后的配电网调压，有些情况不能满足要求，而且会影响其他馈线线路。在此基础上提出采用 ASVG 调压，对 ASVG 的结构进行详细的阐述，建立了 ASVG 数学模型，并针对不同容量不同接入位置的分布式电源进行调压，从仿真结果可以看出 ASVG 具有良好的调压效果。在 DG 退出运行后，ASVG 仍然具有支撑电压的效果。

第六章 结论与展望

随着电力体制改革的发展,分布式电源也可为用户提供一种选择,使其更能适应易变的电力市场。能源是社会经济和人民生活水平的主要物质基础,对于社会经济的发展和人民生活水平的提高极为重要。当今社会对能源需求也不断增加,能源的多样化和可循环利用是满足能源需求的根本途径。分布式电源及其应用是本世纪最受重视的高科技领域之一,是电力系统的一个新的发展方向。DG 的接入会影响电力系统的潮流分布,其中对配电网的电压反映较为敏感。因此必须对分布式电源接入配电网进行研究,分析它对配电网电压所造成的影响,其中包括有利的影响也包括不利的影响,并针对这些影响提出解决的方法。

6.1 主要结论

本文主要是针对分布式电源并入配电网之后的电压调整问题进行分析,取得成果如下:

(1) 建立了均匀配电网模型,包括电压等级、接线方式、负荷模型、运行方式以及功率表示形式的 DG 模型,并通过此模型研究了 DG 引入配电网后的电压分布计算方法—DG 叠加算法,通过仿真验证了所提出算法的正确性。

(2) 基于 DG 引入之后配电网电压的叠加原理公式,对电压分布进行了分析。针对分布式电源的不同容量、不同接入位置以及不同功率因数等多个因素,分别讨论了其对配电网电压分布的影响。仿真结果表明:分布式电源容量越大对馈线电压的影响也就越大;分布式电源距离系统母线越远,对馈线电压的影响越大,离系统母线越近,对馈线电压的影响越小;对可进行功率因数控制的分布式电源,其输出无功越多,对馈线电压的影响越大。

(3) 提出了针对辐射形配电网的分布式电源最优接入位置的算法,该算法主要考虑将系统网损最低作为目标函数,将系统电压不越限作为约束条件,仿真试验验证了该算法的合理性和可靠性。

(4) 文中所采用的变压器为有载调压变压器,虽然通过改变变压器的变比,可达到调压的目的。但仿真结果表明:利用改变变压器的变比调压不适用于各种接入状况的分布式电源,此调压方法不具有普遍性。

(5) 通过对利用 ASVG 在分布式电源接入和退出配电网进行调压的仿真,得出了利用 ASVG 调压较为理想的效果。仿真结果表明了该种调压方法适用于分布式电源的各种接入情况,无论是在其并入还是退出运行时,都能满足调压要求。

6.2 展望

由于分布式电源设施的安装周期短,不需要现存的基础设施,而且与大型的中

央电站及发电设施相比总投资较少，因此在电力竞争性市场建立后分布式电源的作用将会日益明显和重要，从而可与现有电力系统结合形成一个高效、灵活的电力系统，提高整个社会的能源利用率，提高整个供电系统的稳定性、可靠性和供电质量。可以从以下几个方面对分布式电源未来的研究方向进行深入的研究^[40]：

(1) 现有分布式电源的完善和新型技术的研发，如开发新的电解质材料和催化剂，提高燃料电池的性能、使用寿命、性能价格比等；

(2) 采用新的算法(如遗传算法等)建立分布式电源的等值模型，研究分布式电源的极限功率及其对电力系统稳定的影响，研究分布式电源故障时对电网暂态的影响及相应的控制策略；

(3) 通过负荷灰色预测技术、专家系统预测技术、神经网络预测技术及小波分析预测技术建立精确的随机性负荷模型，从而建立分布式电源的发电量预报。

(4) 以分布式发电的发电量预报为基础，从随机最优控制原理出发，结合智能控制(人工神经网络、模糊控制、遗传算法)及现代控制理论，建立分布式电源的自动发电的随机最优控制模型及电压、频率随机自适应控制模型；

(5) 基于全球定位系统(GPS)技术、通讯技术、数字信号处理(DSP)技术以及电力系统的动态测量和在线监测技术，实现含有分布式电源的配电网动态监测、灵活跟踪和调度控制；

(6) 建立新型电力公司与用户的关系体系，妥善研究和制定与分布式电源有关的法律、法规和行业规范，研究分布式电源对电力市场的影响。

参 考 文 献

- [1] Lawrence R, Middlekawff S. Distributed generation the new guy on the block. IEEE industry applications 50th annual: IEEE, 2003: 223~228
- [2] 王庆一. 能源形式评估. 能源政策研究, 2001: 1~11
- [3] 梁宜. 21 世纪电力前沿科技的现状及发展. 水利电力科技. 2003, 28(4): 1~8
- [4] 程明. 新能源与分布式电源系统(上). 电力需求侧管理. 2003, 5(3): 44~46
- [5] 王敏, 丁明. 分布式发电及其效益. 合肥工业大学学报, 2004, 7(4): 354~358
- [6] 何季民. 分布式电源技术展望. 东方电气评论, 2003, 17(1): 9~14
- [7] 吴靖, 江昊. 分布式发电系统的应用及前景. 农村电气化, 2003, (7): 19~20
- [8] Salman S K. The impact of embedded generation on voltage regulation and losses of distribution networks. IEE Colloquium on the Impact of Embedded Generation on Distribution Networks, October, 1996: 2/1~2/5
- [9] 韦刚, 吴伟力, 胡丹云, 李智华. 分布式电源及其并网时对电网的影响. 高电压技术. 2007(1): 36~40
- [10] Brown R E, Freeman L A. Analyzing the reliability impact of distributed generation. Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, July, 2001, (2): 1013~1018
- [11] 莫颖涛, 吴为麟. 电力电子技术在分布式发电中的应用. 华北电力技术. 2004, (9): 48~49
- [12] P.P.Barker and R.W. Mello. Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1-Radial distribution systems. IEEE 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 3: 1645~1656
- [13] Ackerman T, Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network: Operation aspects. Proc. of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Asia Pacific. 2002: 1357~1362
- [14] Doyle M T. Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system production. Power engineering society meeting: IEEE, 2002, Vol 1: 103~105
- [15] 王敏, 丁明. 含有分布式电源的配电网系统规划. 农村电气化, 2003, (7): 19~20
- [16] 叶在福, 单渊达. 多种遗传算法在电网扩展规划中应用的改进. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5): 55~61
- [17] 吴奇石, 邱家驹. 配网规划智能决策支持系统的研究-基于地理信息系统及人工智能方法. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(3): 15~22

- [18] GIRGIS A, BRAHMA S. Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System. In: Proceedings of 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Hahfax(Canada): 2001, 115~119
- [19] Guillot M, Collombet C, Bertrand P et al. Protection of embedded generation connected to a distribution network and loss of mains detection[C]. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001, (4): 254
- [20] 杨金焕, 陈中华. 世纪太阳能发电的展望. 上海电力学院学报, 2001, 17(4): 23~28
- [21] 丰卫平. 家庭太阳能发电系统. 电气时空, 2002, (2): 22
- [22] S.J.Chiang, K.T.Chang, C.Y.Yen. Residential photovoltaic energy storage system. IEEETrans. Ind.Elec, 1998, 6: 385~394
- [23] H.P.Kan, K.T.Chau, M.Cheng. Development of doubly salient permanent magnet motor flywheel energy storage for building integrated photovoltaic system. Proceeding of IEEE Applied Power Electronic Conference and Exposition, 2001, 1: 314~320
- [24] Padull_es J, Ault G.W. and McDonald J.R. An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation. International Journal of Power Sources 86. 2000: 495~500
- [25] 郑健超. 电力前沿技术现状和前景. 中国电力, 1999, 32(10): 9~12
- [26] Hydro-Québec Transénergie Technologies. SimPowerSystems for Use with Simulink, Users Guide. The MathWorks, Inc. 2002
- [27] 苑舜, 韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [28] 梁合. 配电线路. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [29] Willis, H, L. Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE Volume 3, 16-20 July 2000 Page (s): 1643~1644
- [30] Keane A, O'Malley M. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks. IEEE Trans on Power Systems, 2005,20(3): 1640~1646
- [31] Caisheng Wang, Nehrir, M.H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems, Power systems, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 4, Nov, 2004 Page(s): 2068~2076
- [32] 王志群, 朱守真, 周双喜等. 分布式电源接入位置和注入容量限制的研究. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 53~57
- [33] Y. Baghzouz. Some general rules for distributed generation feeder interaction. 2006

- IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006
- [34] Farid Katiraei, Chad Abbey and Richard Bahry. Analysis of voltage regulation problem for a 25-kV distribution network with distributed generation. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 18-22 June 2006 Montreal, Canada
- [35] 程浩忠, 吴浩著. 电力系统无功与电压稳定. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [36] 黄秀萍. 有载调压变压器变比变化对电力系统电压的影响. 电力建设, 2004, 25(11): 37~41
- [37] 陈芳, 李儒, 吴珊珊. 浅谈有载调压变压器在电力系统中的应用. 广东电力, 1999, 12(4): 62~63
- [38] 倪晶. 固态继电器在配电变压器有载调压中的应用研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2003
- [39] 肖湘宁, 尹忠东, 续永海. 现代电能质量问题. 电气时代, 2004, (11): 48~52
- [40] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. 电网技术, 2003, 27(12): 71~75
- [41] 胡志成. 分布式电源接入系统的研究: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2005
- [42] 葛清. 分布式发电对电压跌落的影响及失电损失分摊研究: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007
- [43] 顾承红, 艾芊. 配电网中分布式电源最优布置. 上海交通大学学报, 2007, 41(11): 1896~1900
- [44] T.E.Kim, J.E.Kim. Voltage Regulation Coordination of Distributed Generation System in Distribution System. Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, IEEE. Volume 1, 15-19 July 2001 Page(s): 480~484 vol. 1
- [45] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 53~56

致 谢

本文是在恩师杨淑英副教授的悉心指导下完成的，从选题、研究进展的每一步、论文的撰写到最后的定稿无不体现着恩师多年的精心指导和亲切关怀。恩师高尚的人格、宽广的胸襟、渊博的知识、严谨的治学作风、无私的奉献精神、对科学前沿的敏锐洞察力以及对科学事业的执著追求使学生深受熏陶，并将终生受益。借此论文完成之际，谨向恩师致以诚挚的敬意！

在论文的完成过程中，实验室的同学们也给予了我许多支持和帮助，在此一并表示感谢！此外论文还参阅了大量的文献资料，在此也向这些文献的原作者表示感谢！

还要特别地感谢我的家人，正是他们的全力支持和关心理解才使我的论文得以顺利完成！感谢所有曾给予我帮助、支持、关心、鼓励的老师、同学、朋友和亲人！最后，衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩会的各位专家、教授！

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1] Yang Yanfang, Yang Shuying. Study of Impacts on Voltage of Distribution Network with Distributed Generation. RIUGCEE2008, xi'an, China, 2008, 7
- [2] 杨艳芳, 杨淑英. 浅谈分布式发电及其对配电网的影响. 中国电力教育研究综述与技术论坛专刊

分布式电源并网后配电网调压问题的研究

作者: [杨艳芳](#)

学位授予单位: [华北电力大学\(保定\)](#)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1455122.aspx

授权使用: 北京服装学院(bjzxy), 授权号: b90c5420-bd8d-4ef7-83c9-9e6c0175a310

下载时间: 2011年1月15日